

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Keemia instituut

Eeva Vahtramäe
**REOVEESETTE KÄITLEMINE
HUMIFITSEERIMISVÄLJAKUTEL**

Magistritöö (30 EAP)

Juhendajad: PhD Taavo Tenno

MSc Markus Raudkivi

Tartu 2017

Reoveesette käitlemine humifitseerimisväljakutel

Reovee puhastusprotsessi käigus tekib sekundaarset jäädet ehk reoveesetet, mille käitlemisele ja hilisemale kasutuselevõtule on lähtuvalt karmistuvast seadusandlusest vaja enam tähelepanu pöörata. Reoveesetet on võimalik kasutada põllumajanduses mullaparandajana, kuid seda piirab sette raskmetallide, püsivate toksiliste ühendite ja patogeenide sisaldus. Üheks sette käitlemise meetodiks on humifitseerimisväljakud, kus taimede kaasabil toimub veetustumine ja settes sisalduva orgaanika lagunemine. Käesolev töö annab ülevaate reoveesettes sisalduvatest ainetest, kasutamisega seotud seadusandlusest ning humifitseerimisväljakutest. Töö praktiline osa ning arutelu toetub kolme Eesti olmereoveepuhasti reoveesette parameetrite analüüsil. Töö peamine eesmärk on hinnata humifitseerimisväljakutel käideldud sette vastavust määruses toodud kriteeriumitele. Tulemustest selgub, et humifitseerimisväljakul käideldud reoveesetel on võimalik saavutada keskkonnaministri määrusest tulenevaid stabiliseerituse nõudeid 2-3 aastaga. Stabiliseeritust hinnati sette hapnikutarbe (mgO_2/KA) kui põletuskao ja kuivaine (OA/KA) suhte järgi.

Märksõnad: reoveesete, reoveesette käitlemine, humifitseerimisväljak, toitained

T270 Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll

Sewage sludge treatment in humification bed system

Sewage sludge is semi-solid material that is produced as a by-product during wastewater treatment. The treatment and reuse or disposal of sewage sludge need more attention due to strictened legislation. Sewage sludge can be used in agriculture as a soil improver but that kind of use is limited because sludge contains heavy metals, toxic compounds, pathogens etc. An alternative sludge treatment process, such as humification may help to regain the acceptance of sludge recycling. The purpose of the humification beds and plants is to dewater the sludge by drainage and evapotranspiration and to allow a longer time for the stabilization and mineralization of sludge. This paper focuses on topics related to sewage sludge (substances, legislation, treatment and reuse). The main objective of this work is to evaluate humified sludge compliance with legislation. The results show that sewage sludge can achieve needed stabilization requirements during 2-3 years of treatment.

Keywords: sewage sludge, sludge treatment, humification bed system, nutrients

T270 Environmental technology, pollution control

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Kirjanduse ülevaade	6
1.1 Reoveesete	6
1.1.1 Orgaaniline aine reoveesettes	7
1.1.2 Lämmastik ja fosfor reoveesettes	7
1.1.3 Raskmetallid	8
1.1.4 Patogeenid	9
1.1.5 Antibiootikumid reoveesettes	10
1.2 Seadusandlus	11
1.2.1 Nõuded raskmetallide sisaldusele	11
1.2.2 Nõuded stabiliseeritusele ja hügieniseeritusele	12
1.2.3 Nõuded ravimijääkide sisaldusele	13
1.3 Reoveesete kasutamine põllumajanduses ja haljastuses	14
1.4 Reoveesete käitlemine	15
1.4.1 Reoveesete humifitseerimisväljakud	16
2 Materjalid ja meetodika	19
2.1 Proovivõtt	19
2.2 Analüüsimeetodid	20
2.2.1 Proovide stabiliseerituse määramine OXITOP-meetodil	21
3 Tulemused	24
3.1 Rõhu muutus erinevate reoveepuhastite sette korral	24
3.2 Reoveesete hapnikutarve ja OA/KA	26
3.3 Sette lämmastiku- ja fosforisisaldus	28
4 Analüüs ja arutelu	31
4.1 Reoveesete stabiliseerituse saavutamine	31
4.2 Sette põllumajanduslik väärtus	35

4.3	Soovitused	37
	Kokkuvõte	38
	Summary	39
	Kasutatud allikad.....	40

Sissejuhatus

Reovee käitlemise käigus ärastatakse bioloogiliste, keemiliste või füüsikaliste meetoditega puhastatavast reoveest soovimatud tahkised, organismid ning reoained. Protsessi käigus tekib puhastitesse sekundaarset jäädet ehk reoveesetet, mille kogus ja parameetrid sõltuvad peamiselt reovee puhastamise tehnoloogiast. Reovee käitlemine mõjutab settes sisalduvate orgaaniliste ainete, raskmetallide ja patogeenide kogust. Lähtuvalt üha karmistuvast seadusandlusest on vaja tähelepanu pöörata väikestes reoveepuhastites tekkiva reoveesette käitlemisele ja hilisematele kasutusvõimalustele.

Reoveesette kasutamise üheks võimaluseks pinnase rekultiveerimise, haljastuses kasutamise, energiatootmismetodite jm kõrval on põllumajandus, kus käideldud setet saaks kasutada näiteks mullaparandajana. Üldjuhul on selline sette kasutamine piiratud või isegi keelatud, sest sete sisaldab raskmetalle, püsivaid toksilisi ühendeid ja patogeenseid mikroorganisme. Seetõttu taasvääringdatakse setet põllumajanduses vähe.

Reoveesette kasutusvõimaluste suurendamiseks ning käitlemisefektiivsuse tõstmiseks on sobiva meetodina välja toodud taimede, näiteks pilliroo *Phragmites communis*, kasutamine. Taimed suurendavad sette veetustamist ning saadavat produkti on võimalik kasutada põllumajanduses. Eeltoodud meetodi jaoks kasutatakse mõistet humifitseerimisväljak, sest taimede kaasabil toimub settes sisalduva orgaanika lagunemine sarnaselt pinnases toimuvale humifitseerimisprotsessile.

Antud magistritöö eesmärkideks on:

1. Hinnata humifitseerimisväljakutel käideldud reoveesette stabiliseeritust kolme Eesti olmereoveepuhasti näitel;
2. Hinnata humifitseerimisväljakutel käideldud reoveesette sobivust kasutamiseks põllumajanduses ja haljastuses.

1. Kirjanduse ülevaade

1.1 Reoveesete

Reoveesete on reoveepuhastusprotsessi käigus tekkiv jääk, mis koosneb vedelast ja tahkest fraktsioonist. Vedel faas pärineb töödeldavast reoveest. Tahke faas koosneb peamiselt puhastusprotsessi läbiviivatest mikroorganismidest (aktiivmuda) ning reovees olevast heljumist. Töötlemata ja käitlemata sette kuivainesisaldus (KA) sõltub konkreetsest reoveest ja kasutatavast puhastustehnoloogiast ning on võrdlemisi madal (ca 2% KA). Erinevate settekäitlusmeetodite rakendamisel veesisaldus väheneb ning KA sisaldus suureneb [1].

Euroopas tekib keskmiselt reoveesetet kuivkaalus 90 g inimese kohta päevas, mis on üle 30 kg setet inimese kohta aastas [2]. Eesti reoveepuhastites tekkis 2010. aasta jooksul umbes 178 tuhat tonni setet märgkaalus, üle 2 000 ie (inimekvivalent) reostuskoormusega reoveekogumisalad tootsid sellest ca 114 tuhat tonni ehk 64% [3]. Kui sette kogus sõltub puhastusprotsessi efektiivsusest, siis sette kvaliteet on mõjutatud peamiselt reostuskoormusest ja puhastusprotsessi opereerimisest ning tehnilistest iseärasustest. Kuna sete on reoveepuhastuse vältimatu jääk, siis on ka sette edasine käitlus üks osa kogu reoveepuhastusest [2]. Settekäitlust võib pidada efektiivseks, kui on tagatud saadava produkti ringlussevõtt ning kasutatavus ilma kahjulike saasteainete levikuta ümbritsevasse keskkonda [4].

Üha enam pööratakse tähelepanu reoveesete ringlussevõtule ning kasutusvõimalustele. 2010. aastal suunati Eestis üle 2 000 inimekvivalendiga reoveekogumisalade reoveepuhastitest kasutusele 89% eraldatud settest. 2010. aasta jooksul eraldati nendest reoveepuhastitest erineva kuivainesisaldusega setet ligi 20 tuhat tonni kuivaines. Tartu reoveepuhasti sette kuivaine sisaldus 2010. aastal oli 17%, Tallinnas 27%, Pärnus 20%, Narvas 19%, Kohtla-Järvel 21%, Rakveres 13%. Eraldatud settest võeti kasutusele 17 tuhat tonni (kuivaines) ning prügilas või puhasti oma territooriumil ladustati 2 tuhat tonni reoveesetet (kuivaines). Põhiliseks sette käitlusviisiks Eestis on kompostimine ja saadud produkti kasutamine haljastuses [3].

1.1.1 Orgaaniline aine reoveesettes

Reoveesete sisaldab rohkesti orgaanilist ainet, mille moodustavad peamiselt mikroorganismid ja nende laguproduktid (lahustunud ained nt süsivesikud, aminohapped, valgud ja lipiidid). Tselluloosi ja ligniini sisaldus olmereoveesettes on väike, mistõttu settes olev orgaanika mineraliseerub mikroorganismide ja taimede kaasabil kiiresti. Orgaanika sisalduse tõttu võivad settes toimuda ka käärimisprotsessid ning tekkivate ühendite lenduv osa on see, mis annab settele ebameeldiva lõhna. Stabiilse sette saavutamiseks on orgaanilise aine sisalduse vähendamine üks peamisi aspekte settekäitluses [5].

Orgaanilise aine kontsentratsioon reovees on kõrge (ca 70% KA), kuid varieerub vastavalt kasutatavale reoveepuhastuse tehnoloogiale jm tingimustele. Orgaanika sisaldus on oluline mullaviljakuse ning pinnase omaduste parandamise aspektist, seetõttu on reoveesetet võimalik kasutada pinnase erosiooni ja mulla degradeerumise vähendamiseks [6].

1.1.2 Lämmastik ja fosfor reoveesettes

Reoveesete võib sisaldada nii keskkonda koormavaid saasteaineid (raskmetallid, patogeenid, orgaanilised ühendid) kui põllumajanduslikult väärtuslikke toitaineid, millest tähtsaimad on lämmastik (N) ja fosfor (P). Lämmastik esineb reoveesettes peamiselt orgaaniliste ühendite koostises, vähem ammoniaagi (NH_3) ja muude lämmastikühenditena. Kuna taimed suudavad assimileerida üksnes mineraalset lämmastikku, on erinevate lämmastikühendite mineraliseerumise aste oluline näitaja reoveesete mullaparanuslike omaduste määramisel. Erinevate settekäitlusmeetodite korral on lämmastiku kättesaadavus settest erinev, jäädes vahemikku 4-60%. Mida rohkem on settes lämmastikku, seda väärtuslikum on see põllumajanduslikuks kasutamiseks [6].

Lämmastiku sisaldus reoveesettes on oluliselt mõjutatud reoveepuhastusprotsessi ja sette käitlemise esmaste etappide poolt. Näiteks märkimisväärne osa ammoniaagist on lahustunud sette vedelas faasis, mis eemaldatakse settest veetustamise (tihendamine ja tahendamine) käigus [6].

Fosfor on lämmastiku ja kaaliumi (K) kõrval üks põhiline taimetoitelement, mida taimed kasutavad rakkude ülesehitamiseks ning vahetalitajana hingamisel ja fotosünteesil. Reoveesettes esineb fosfor peamiselt mineraalsel kujul (30-98% kogu fosforist). Sarnaselt

lämmastikule on ka fosfori hulk settes sõltuv reoveepuhastuse tehnoloogiast. Erinevalt primaarsest reovee puhastusest (mehaaniline tahkiste eraldamine) või sekundaarsest käitlemisest (nt bioloogiline süsinikuärastus), on tertsiaarse reoveekäitlemise (N ja P ärastamine) korral ka settes sisalduvate toitainete hulk suurem.

Erinevalt lämmastikust, ei sõltu taimede jaoks reoveesetest fosfori kättesaadavus settekäitlusmeetodist ning on põllumaale laotatuna üle 50%. Samas on välja toodud, et kasutatavate tugimaterjalide (saepuru, põhk, turvas vm) madala fosforisisalduse tõttu sisaldab komposteeritud reoveesete kogumahult vähem fosforit kui muul viisil töödeldud sete [6][5].

Eesti reoveepuhastites läbi viidud uuringu järgi on töötlemata reoveesetes keskmine üldlämmastiku ja -fosfori sisaldus vastavalt $59,3 \pm 12,4$ g/kg KA ja $18,6 \pm 7,1$ g/kg KA [7].

1.1.3 Raskmetallid

Raskmetalliks nimetatakse mistahes metalli, mille tihedus on rohkem kui 5 g/cm^3 . Selle kategooria metallid on üldjuhul toksilised ka madalatel kontsentratsioonidel. Raskmetallid on maakoore looduslikud komponendid ja mõned neist on keskkonnale ning organismidele vajalikud mikroelemendid ainevahetusprotsessis (nt Cu, Mn, Co) [8].

Tööstuse areng ja kasvav tarbimine on suurendanud nõudlust metallide järele, mille tagajärjel on suurenenud ka raskmetallide kontsentratsioonid reovees. Peamised raskmetallid reovees on elavhõbe (Hg), plii (Pb), kroom (Cr), tsink (Zn) ning kaadmium (Cd). Olmereovette satuvad raskmetallid peamiselt kodumajapidamistest (nt kemikaalid, ravimid), teedelt kogunenud sadevee äravoolu kaudu ning munitsipaalkanalisisatsiooniga ühenduses olevatest tööstustest [6]. Enamik raskmetalle ei püsi lahuses, vaid adsorbeeruvad heljumi osakestel ning sadestuvad. Kuna reoveesette üheks tahke faasi osaks on heljum, siis tuleb settes määrata ning vajadusel vähendada raskmetallide kontsentratsiooni [5].

Põhilised raskmetallid, mis piiravad sette põllumajanduslikku kasutust on tsink, vask, nikkel, kaadmium, plii, elavhõbe ja kroom [5]. Eesti Keskkonnaministeeriumi tellitud ning Keskkonnauuringute Keskuse (EKUK) poolt läbi viidud uuringule (2010.a) tuginedes ei ole Eestis probleeme reoveesetes raskmetallide kontsentratsiooni piirnormide saavutamisega. Seiratud 47-st reoveepuhasti settest 46 vastas raskmetallide piirnormidele [9].

Raskmetallide pinnases liikuvust mõjutab oluliselt pH. Mida kõrgem on pH väärtus, seda suurem on raskmetallide adsorptsioonivõime savi- ja orgaanikaosakeste külge. Põllumajanduslikel muldadel, mille pH on alla 5, tuleks sette kasutamist piirata, sest raskmetallide liikuvus madala pH tingimustes on oluliselt suurem kui kõrgema pH korral. Reoveesette kasutamisel põllumajanduslikul maa-alal võivad raskmetallid madala liikuvuse tõttu pinnases akumul eeruda, mistõttu nende kontsentratsioon kasvab iga väetamiskorraga. Reoveesette kasutamise jaoks muldadel, mille pH on kõrgem kui 7 ning mis sisaldavad vähemalt 5% kaltsiumkarbonaati (CaCO_3), võib kehtestada leebemad raskmetallide piirnormid [5].

1.1.4 Patogeendid

Reoveesete sisaldab erinevaid mikroorganisme ning suurem on nende kontsentratsioon just setetes, mis pärinevad bioloogilise käitlusega reoveepuhastitest (nt aktiivmuda protsess). Mikroorganismide olemasolu ning kogus settes sõltub nii elanikkonna suurusel, tööstuste olemasolust, kasutatavatest sanitaarmedetmetest kui reoveepuhasti enda tüübist. Osa nendest mikroorganismidest (bakterid, algloomad, helmindid, seened jt) on patogeensed ning võivad põhjustada inimestele haigusi. Kokkupuude haigustekitajatega toimub suuremal jaol toorete köögiviljade ning töötlemata liha kaudu, mis on väetamiseks kasutatud reoveesetega kokkupuutes olnud [6].

Kuna patogeenide munad ja tsüstid võivad elus püsida ka pikki perioode (mitu aastat) teatud soodsate tingimuste esinemisel, siis on settekäitluse juures oluline osa hügieniseerimisel ehk haigustekitajate hävitamisel. Selle protsessi käigus vabanetakse osaliselt või täielikult kahjulike mikroorganismide vegetatiivsetest vormidest. Settes leidub väga erinevaid mikroorganisme (sh patogeene), mistõttu on mõeldamatu, et kontrollitakse kõikide haigustekitajate olemasolu ning hulka. Sellest tulenevalt on läbiviidud uuringute põhjal välja valitud indikaatororganismid, mis on settes arvukalt esindatud ja mille vastupidavus erinevatele töötlemistele on sarnane paljude patogeenidega. Kuna üks indikaatororganism ei kirjelda kogu mikroorganismi kooslust ja võimalikku esinemist settes ning ei kata kõiki kriteeriume, siis on kasutusele võetud erinevad indikaatorid [10]. Settekäitluses on indikaatoritena kasutusel nt *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Enterococcus* ja *Clostridium perfringens* [7].

Settes olevad patogeenid levivad ja kanduvad edasi peamiselt pinnase ülemistes kihtides, kuhu sete on laotatud. Mikroorganismide jõudmine sügavamatesse kihtidesse sõltub mitmetest otsestest ja kaudsetest teguritest nt pinnase struktuur (praod, poorid jm), kliimafaktorid (päikesevalgus, temperatuur, sademed), laotatud sette kogus ja patogeenide sisaldus ning konkureerivate organismide esinemine [6].

1.1.5 Antibiootikumid reoveesettes

Antibiootikumide raviomadused on teinud nendest lahutamatu osa tänapäeva meditsiinis ning kõrge tervishoiutaseme tagamises. Nii inimese kui ümbritseva keskkonna aspektist vaadatuna on tähelepanunõudev ja murettekitav just antibiootikumide kasutamise ja käitlemisega seotud võimaliku kahjuliku mõju esinemine. Uuringud on näidanud, et pärast reoveepuhasti läbimist vabanevad ravimite jäägid koos teist ühenditega keskkonda ning võivad muuhulgas tuua kaasa ka antibiootikumidele resistentsete bakterite arenemise ja leviku [11].

Antibiootikumid ja nende jäägid satuvad reoveepuhastitesse ja sealhulgas reoveesettesse nt kodumajapidamiste kanalisatsiooniga (kasutamata ravimite ära viskamine), haiglatest ja veterinaarasutuste kaudu [12]. Veterinaarias kasutatavad antibiootikumid, mis võivad ulatuda ca 70% kogu antibiootikumide toodangust, jõuavad loomade sõnniku kaudu põllule ning sealt edasi pinnasesse ja põhjavette [13].

Reoveepuhastitest leitud antibiootikumid on nt ciprofloxacín (CIP), sulfoonamiidid, tetratsükliinid, ofloxacín (OFL) jt. Mõned ravimid lagunevad inimese või looma organismis täielikult, kuid on ka selliseid, mis väljuvad organismist muutumatu kujul või metaboliitidena ning jõuavad reovette. Antibiootikumid jt ravimid võivad edaspidiselt reovees, -puhastis või keskkonnas laguneda mittetäielik ning lagunemisprotsess võib kesta aastaid (nt fluorokinoloonid). Selle aja jooksul võivad ravimijäägid põhjustada keskkonnas muutusi (kuhjumine elusorganismides ning jõudmine toidulauale, mulla mikroorganismide hävimine, tõvestavate mikroorganismide ravimiresistentsus jm) [14].

Seni koostatud raportite põhjal on Eestis antibiootikumide kogukasutus viimaste aastakümnetega stabiliseerunud ning jääb teiste Euroopa riikidega võrreldes madalale. Lisaks on välja toodud, et üldiselt on antibiootikumide kasutamine korrelatsioonis ravimiresistentsete haigustekitajate levimisega riigis. Näiteks maades, kus antibiootikume vähem kasutatakse, esineb ka vähem ravimiresistentsust ning esmavalikuna eelistatakse nendes piirkondades kitsama toimespektriga antibiootikume [15].

1.2 Seadusandlus

Euroopa Parlamendi ja Nõukogu jäätmete direktiiv (2008/98/EÜ) näeb ette jäätmetekke ja -ladestamise vähendamist ning jäätmehierarhia praktilise rakendamise soodustamist. Direktiivi põhimõtete ülevõtmine riigisisese seadusandlusesse on nõutud kõigilt liikmesriikidelt, kaasa arvatud Eestilt [16]. Sellest tulenevalt on koostatud nii Eesti Vabariigi jäätmeseadus kui riigi jäätmehooldust korraldav ja suunav valdkonna strateegiline arengukava (Jäätmekava 2014-2020), mis on suunatud jäätmetekke vähendamisele.

Reoveesete on praeguse Eesti seadusandluse kontekstis jääde, mida tuleb nõuetekohaselt käidelda ning mille kasutust ja vedu tuleb teostada vastavalt jäätmeseaduses kehtestatud nõuetele. Reoveesete kvaliteedi tõstmiseks ja kasutusvõimaluste laiendamiseks tuleb luua ühtne settekäitluse raamistik ja jäätmete lakkamise kriteeriumid reoveesete kohta. Keskkonnaministeeriumi tellimisel töötatakse välja kriteeriumid, mille alusel reoveesete lakkaks edaspidi olemast jääde ning seda saaks keskkonnale ja inimestervisele ohutult taaskasutada ja ringlusesse võtta [17].

Euroopa Liidus on reoveesete kasutamine põllumajanduses sätestatud Euroopa Nõukogu direktiiviga (86/278/EMÜ), mille eesmärk on reguleerida reoveesete kasutamist põllumajanduses, et vältida kahjulikku mõju pinnasele, taimedele, loomadele ja inimestele ning soodustada selle nõuetekohast kasutamist. Kuna reoveesetel võib olla põllumajanduslikult väärtuslikke omadusi on õige soodustada selle nõuetekohast kasutamist põllumajanduses [18]. Eestis reguleerib praegu reoveesete kasutamist keskkonnaministri määrus nr 78 „Reoveesete põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded,“ mille kohaselt on samuti oluline vältida sette kahjulikku mõju pinna- ja põhjaveele, mullale, taimedele, loomade ja inimeste tervisele [19].

1.2.1 Nõuded raskmetallide sisaldusele

Põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel tohib kasutada ainult sellist setet, mis on eelmainitud määruse mõistes käideldud ning vastab kehtestatud nõuetele. Raskmetallide nagu kaadmium, vask, nikkel, plii, tsink, elavhõbe ja kroom kohta on määrukses sätestatud kindlad piirväärtused (mg/sette KA kg kohta), millest rohkem ei tohi settes vastavat raskmetalli esineda (Tabel 1). Reoveesete kasutamine tuleks ära keelata, kui antud metallide sisaldus ületab kõnealused piirnormid [18].

Tabel 1. Põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutatava sette ning kompostis lubatud raskmetallide sisalduse piirväärtused [19][20].

Raskmetall	Piirväärtus settes (mg/kg KA)	Piirväärtus kompostis (mg/kg KA)
Kaadmium	20,0	1,3
Vask	1000,0	200,0
Nikkel	300,0	40,0
Plii	750,0	130,0
Tsink	2500,0	600,0
Elavhõbe	16,0	0,45
Kroom	1000	60,0

Kõige karmimad nõuded on elavhõbeda ja kaadmiumi osas, vastavalt 16 ja 20 mg/sette KA kg kohta. Kõige kõrgem piirväärtus on tsingil (2500 mg/sette KA kg kohta). Kui vähemalt ühe raskmetalli sisaldus settes on suurem, kui ette kirjutatud piirväärtus, siis seda setet on keelatud kasutada. Samuti tuleb määrata mulla enda raskmetallide sisaldus ja pH. Näiteks on setet keelatud kasutada maa-alal, kus kaadmiumi sisaldus mullas on suurem kui 3 mg/KA kg, mulla pH on ≤ 5 , muld on liigniiske või külmunud (sh lumega kaetud) [19].

1.2.2 Nõuded stabiliseeritusele ja hügieniseeritusele

Reoveesetet tuleb enne põllumajanduses kasutamist töödelda. Euroopa Liidu liikmesriigid võivad teatavate tingimuste korral siiski lubada töötlemata reoveesette kasutamist, kui see ei ohusta inimeste või loomade tervist [18]. Sete on töödeldud, kui selles sisalduv orgaaniline aine on pinna- ja põhjaveele, mullale, taimedele, loomade ja inimese tervisele ohutuks muudetud läbi keemilise, bioloogilise või termilise töötlusmeetodi. Seega ei kuulu töödeldud sette hulka selline sete, kus on vaid vähendatud veesisaldust või lisatud tugimaterjale. Sette stabiliseerimine tähendab peamiselt settes oleva orgaanilise aine vähendamist ning seeläbi mineralisatsiooni suurendamist ja lõhna ning sette massi vähendamist.

Sette stabiliseeritust saab hinnata viie parameetri põhjal, millest vähemalt üks peab olema täidetud [19]:

- hapnikutarve on alla 10 mg O₂/g KA 96-tunnise mõõtmisperioodi järel;
- orgaanilise aine sisaldus on vähenenud vähemalt 38% võrra;
- põletuskao ja kuivaine suhe OA/KA on alla 0,6;
- lenduvate rasvhapete kontsentratsioon on alla 0,43 g KHT/g OA;
- biogaasi jääkpotsiaal on alla 0,25 l/g OA.

Põllumajanduslikku kasutust piirab lisaks veel sette patogeenide sisaldus. Hügieniseerimine on bioloogiline, keemiline või termiline protsess, mille tulemusena väheneb settes sisalduvate haigusttekitavate patogeenide sisaldus. Määruse tingimused hügieniseeritusele on järgmised:

- *Escherichia coli* alla 1000 PMÜ (pesa moodustav ühik) ühe grammi töödeldud sette märgkaalu kohta;
- mitte üle 1 helmintide muna 10 grammi töödeldud sette märgkaalu kohta [19].

1.2.3 Nõuded ravimijääkide sisaldusele

Antibiootikumide jt ravimite ohutule sisaldusele settes, kompostis või sõnnikus ei ole praeguste uuringute ja raportite põhjal selgusele jõutud, mistõttu puuduvad ka sellekohased nõuded seadusandluses. EMEA/CVMP/055/96 kohaselt võiks ravimisisalduse piirnormiks sõnnikus olla 100 µg/kg, sõnnikuga väetatud mullas 10 µg/kg ja vees 10 ng/l. Antud norme ei pea põhjendatuks aga Euroopa Liidu Teaduskomitee, sest sellised ravimisisaldused ei ole kõikidele mulla- ega veeorganismidele ohutud. Soovitatud piirnormideks on 1 µg/kg mullas ja 0,4 ng/l vees. Et vältida mikroorganismidel resistentsuse teket on M. Montforts koostatud raportis välja toodud piirnormid veelgi väiksemad ehk 0,1 µg/kg mulla kohta. Väetamiseks kasutatavas reoveesettest, kompostis või sõnnikus ei tohiks kontsentratsioonide mitteületamiseks ravimijääkide sisaldus olla suurem kui 1 µg/kg. Oluline on märkida, et eeltoodud piirnormid ravimisisalduste osas on soovituslikud ning kohustuslikke analüüse ei pea sette, komposti või sõnniku kasutamisel rakendama [21].

1.3 Reoveesette kasutamine põllumajanduses ja haljastuses

Euroopa Liidus on võetud üldine suund jäätmete ja potentsiaalset ressursi sisaldavate materjalide (sh reoveesette) taaskasutamisele ja ringlussevõtule. Reoveesette kasutamise peamiste väljunditena nähakse põllumajanduslikku rakendamist ning kasutamist haljastuses ja pinnase rekultiveerimisel, mistõttu sette ladustamine prügilates peaks vähenema. Sette kasutusvõimalused sõltuvad kohalikul tasandil aga nii geograafilistest, geoloogilistest, õiguslikest, sotsiaalsetest kui majanduslikest aspektidest.

Reoveesete sisaldab lämmastikku ja fosforit, mistõttu saab setet kasutada just põllumajanduses toitainete mulda transportijana ning mullaparandajana. Kuigi settes sisalduvaid fosfaatühendeid peetakse taimedele kehvemini kättesaadavaks kui väetises olevaid, on reoveesette kasutamine siiski alternatiiviks mullaparanduses. Antud juhul on suurimaks puuduseks võimalik patogeenide, antibiootikumide ning raskmetallide kandumine pinnasesse. Sette põllumajanduslik kasutamine väetiste asemel võimaldaks vähendada ka kemikaalide tootmisest ja kasutamisest tingitud keskkonnamõjusid [22].

Majanduslikust aspektist on reoveesette põllumajanduses kasutamise peamisteks kuluallikateks sette transport ja laotamine põllumaale ning vajadus setet eelnevalt hügieniseerida ehk hävitada haigustekitajad. Neid kulusid oleks võimalik tasakaalustada nt reoveesette müügist saadava tuluga. Sette kui toitaineterikka materjali müük on hetkel kehtiva seadusandluse kohaselt keelatud, kuid oleks edaspidi mõeldav juhul, kui reoveesete on antud regioonis avalikult aktsepteeritud ja jätkusuutlikuks väetamise viisiks tunnistatud meetod [22].

Reoveesette kasutamise eelised põllumajanduses ja haljastuses ning pinnase rekultiveerimisel on järgmised [4][5][23]:

- Settes sisalduv orgaanika parandab mulla füüsikalisi näitajaid (nt struktuur, mineraalide- ja veemahutavus). Pinnase suurem veemahutavus aitab omakorda vältida põllumaa kõrbestumist ja üleujutamist;
- Sette kasutamine vähendab pinnase erosiooni riski;
- Settes sisalduvad toitained (peamiselt lämmastik ja fosfor) tõstavad muldade põllumajanduslikku väärtust;
- Settega põllumaale laotatud toitained vabanevad mulda aeglasemalt kui väetistes sisalduvad ning on seetõttu taimedele pikema perioodi jooksul kättesaadavad;

- Toitainete aeglasem vabanemine vähendab ka riski nende võimalikule leostumisele põhjavette;
- Orgaanika on energiaallikaks mullas elavatele mikroorganismidele ning seeläbi paraneb mullaaktiivsus ja mineralisatsioon.

Lisaks põllumajanduslikule kasutamisele saab reoveesetet suunata ka energia tootmisesse, näiteks metaankääritid või põletamine. Metaankäärituse käigus reoveesette lämmastiku- ja fosforisisaldus oluliselt ei muutu ning seetõttu saab ka eelnevalt kääritatud setet kasutada põllumajanduslikel eesmärkidel. Enamik settest energia tootmise variante on majanduslikult tasuvaks hinnatud ainult suurtes reoveepuhastites (üle 100 000 ie), kus setet tekib suuremates kogustes ning vajaminevate investeeringute tasuvusaeg väiksem.

1.4 Reoveesette käitlemine

Sete tekib nii reoveepuhastuse mehaanilises kui ka bioloogilises etapis ning moodustuva sette omadused sõltuvad nii sissetulevast reoveest kui puhastustehnoloogiast. Reoveesette käitlemine, taaskasutamine või nõuetekohane kõrvaldamine on lahutamatu osa reoveepuhastusprotsessist, et vältida negatiivseid keskkonnamõjusid, mis on seotud settes sisalduvate saasteainetega ning haigustekitajate levikuga inimestele ja loomadele.

Reoveesette esmaseks töötlemise võimaluseks on sette tihendamine ehk veesisalduse vähendamine. Tihendamise protsessi eesmärk on suurendada sette kuivainesisaldust ning vähendada käideldava sette mahtu, eemaldades osa settes olevast vabast veest. Levinud sette tihendamise meetodiks on gravitatsiooniline tihendamine, kus mahutites toimub raskusjõu mõjul osakeste põhjasettimine. Gravitatsioonilise tihendamise eelisteks on peamiselt vähene opereerimisvajadus ja madalad opereerimiskulud (sh minimaalne energiatarve ja kemikaalide kasutamise vajadus). Samas nõuab selline meetod teistega võrreldes suurt pindala ning saavutatav sette kuivainesisaldus on madal (2-3%) [24]. Pärast tihendamist on sete endiselt veel vedelas olekus ning see suunatakse tahendamisele ja lõppkäitlemisele.

Sette tahendamine on protsess, mille käigus väheneb oluliselt sette vee- ning suureneb kuivainesisaldus. Tahendamise eesmärgiks on samuti lõppkäitlust vajava sette mahu vähendamine, mistõttu vähenevad ka lõppkäitluse opereerimiskulud jm. Tahendamise käigus suureneb sette kuivainesisaldus kuni 30%-ni ning sete ei ole enam pumbatav. Settetahenduse meetodid on nt lintpress, kruvipress, tsentrifuugid ja kuivatusväljakud. Meetodi valikul

lähtutakse tavaliselt tahendamist vajava sette kogusest, saavutatavast kuivaineastmest ning protsessi ruumivajadusest [24].

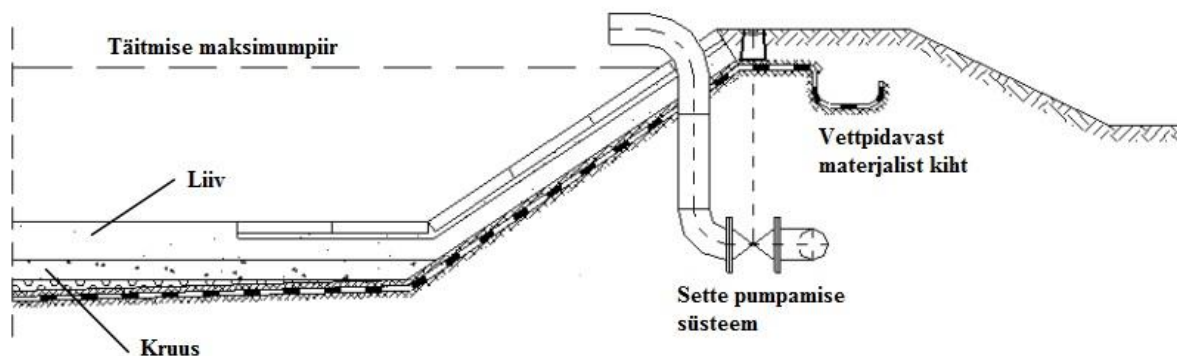
Reoveesette tihendamine ja tahendamine ei ole Eesti seaduse mõistes piisavad settekäitluse meetodid, sest nende tulemusel ei toimu sette stabiliseerumist, vähendatud on ainult veesisaldust. See tähendab, et nende etappide vahel või järgselt peab toimuma sette lõppkäitus, peale mida võib setet käsitleda töödeldud settena. Lõppkäitluse järgselt on sete valmis ladustamiseks või taaskasutamiseks nt põllumajanduses ja haljastuses [19]. Sette lõppkäitlemise meetodid on näiteks anaeroobne kääritamine, kompostimine, lubistabiliseerimine, põletamine jt. Väikestes reoveepuhastites, kus majanduslikel põhjustel ei ole otstarbekas kasutada anaeroobset kääritamist või kompostimist saab kasutada tehnoloogiaid, milles sette stabiliseerimine toimub pikema aja jooksul, näiteks humifitseerimisväljakud.

1.4.1 Reoveesette humifitseerimisväljakud

Humifitseerimisväljakud saab reoveesette käitlemise ja taimede kasutamise alusel jaotada kaheks:

- Pillirooväljakud;
- Muruväljakud;

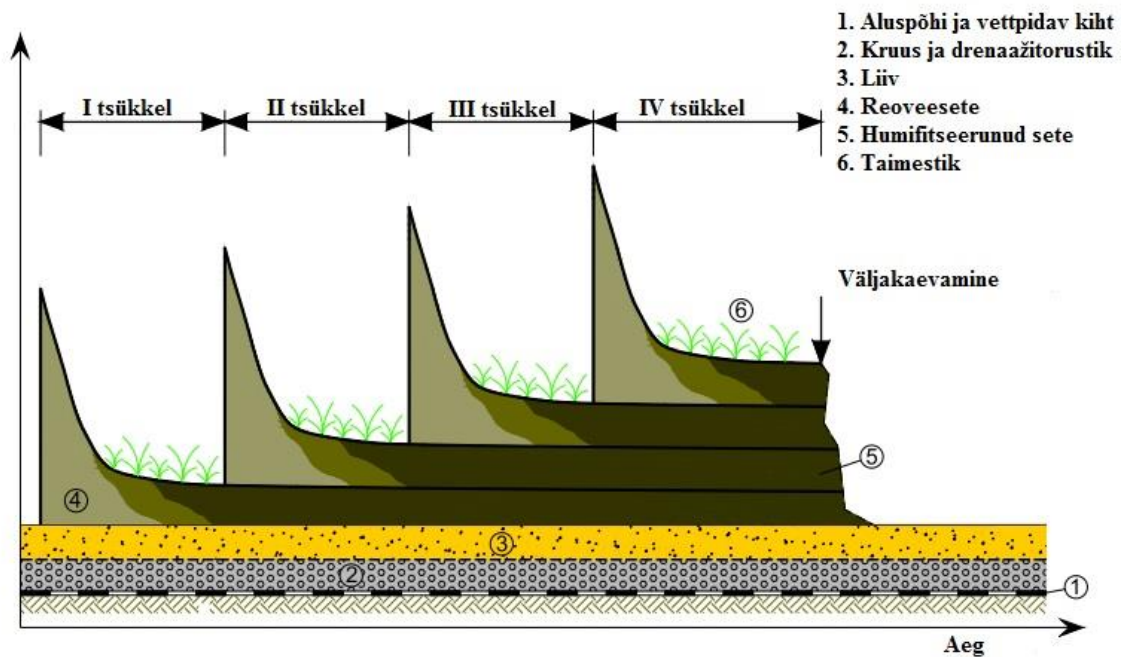
Pillirooväljak koosneb spetsiaalselt ehitatud poldritest, kus reoveesetet käideldakse. Süvendi põhi on mõni tihendatud materjal nt polüetüleen ning selle peal asetseb drenaažisüsteem, mis koosneb nt liivast või kruusast ning drenaažitorustikust (Joonis 1). Väljakute rajamisel pannakse filterkihi peale esialgu u 10 cm paksune substraadikiht, kuhu istutatakse tihedalt peale pilliroog. Väljaku sügavus peaks olema rohkem kui 1,5 m. Esimese aasta jooksul ei toimu märkimisväärtset reoveesette lisamist väljakule, et tagada vajalik pilliroo populatsioon. Reoveesetet juhitakse väljakule iga kahe nädala tagant või vastavalt vajadusele spetsiaalsete torude kaudu, mis paiknevad pillirooväljaku ümber. Taimede kasvamise käigus tekitatakse kanaleid, et reoveesettes olev vesi saaks imbuda drenaažikihti. Samuti kasutavad taimed seda vett oma elutegevuseks [25][26].



Joonis 1. Humifitseerimisväljaku ehitus [25].

Protsess kestab u 10 aastat, peale mida kaevatakse saadud materjal välja ja lastakse kuivada. Kui soovitakse protsessi uuesti käivitada, siis tuleks vajadusel eelnevalt drenaažisüsteem hooldada. Väljakutele suunatakse 30-60 kg (kuivkaalus) reoveesetet ruutmeetri kohta aastas. Pilliroo niitmine on vajalik ainult juhul, kui selle tihedus muutub väljakul liialt suureks ning reoveesette ühtlane jaotumine üle väljaku on takistatud [25][27].

Muruväljakute süvendid on konstrueeritud sama põhimõtte järgi kui pillirooväljakud, aga nende sügavus on väiksem (ca 1 m) ning neid opereeritakse lühema aja jooksul. Lisaks ei ole filterkihi peale vaja substraadikihti, reoveesete suunatakse otse filterkihile. Protsess algab reoveesette lisamisega väljakule (talvel 15 kgKa/m², suvel 25 kgKa/m²), kas korraga või jaotatuna nt mitme nädala peale. Järgneval perioodil (10-20 päeva) reoveesete veetustub drenaažikihi ja aurumise kaudu ning saavutab kuivainesisalduse u 9%. Seejärel külvatakse humifitseerimisväljakule taimed, mille kasvu soodustab reoveesette kõrge toitainete sisaldus. Taimede kasvamise soodustab reoveesette edasist veetustumist ja kobestumist. Pärast paari nädala möödumist taimede kasvamaminekust peaks terve reoveesette kiht olema aeroobne ja hästi õhustatud. Esimene tsüklil on lõppenud, kui kergesti lagundatav orgaanika on mineraliseeritud. Teine tsüklil algab uue reoveesette laotamisega eelmise kihi peale ning edasine protsess kulgeb sarnaselt eelmisele. Pärast 4-6 tsüklit kaevatakse saadud substraat süvendist välja ning kasutatakse nt põllumajanduses, haljastuses või rekultiveerimisel (Joonis 2) [25].



Joonis 2. Humifitseerimisväljaku läbilõige [25].

Süvendite/poldrite arv võib reoveepuhastite puhul erineda, sõltudes peamiselt reoveesete kogusest.

Muruväljakute eelised võrreldes pillirooväljakutega on järgmised [25][26]:

- Protsess saab täismahus alata kohe pärast poldrite valmimist;
- Saadud materjali sõelumine ei ole edasiseks kasutamiseks vajalik;
- Vähem kahjureid, mis võiksid taimi kahjustada;
- Väljakute opereerimine on paindlikum;
- Taaskasutatav materjal valmib muruväljakutel 2-4 aastaga;
- Väljakute rajamine on odavam, sest poldrid ei pea olema nii sügavad kui rooväljakutel ning puudub substraadikihi lisamise vajadus ja pillirootaimede istutamine.

Pillirooväljaku eelised on järgmised [25][26]:

- Kuna väljakud on sügavamad, siis sinna saab rohkem reoveesetet suunata;
- Kui väljakuid opereeritakse hoolikalt, siis ei pea väljakutega midagi tegema kui alles stabiliseerunud materjali väljakaevamisel;
- Kuna protsess on pikem, siis ei pea ka pikema aja jooksul (10 aasta vältel) tegema kulutusi sette taaskasutusse suunamiseks vms.

2 Materjalid ja metoodika

Magistritöö eksperimentaalses osas kasutati kolme Eesti olmereoveepuhasti reoveesetet (Tabel 2).

Tabel 2. Olmereoveepuhasteid iseloomustavad näitajad

Näitaja	Reoveepuhasti A	Reoveepuhasti B	Reoveepuhasti C
Reoveepuhasti koormus (ie)	7719	2000	3839
Tihendamine	Gravitatsiooniline	Gravitatsiooniline	Gravitatsiooniline
Tahendamine	Dekanter-tsentrifuug	Lintpress	-
Saavutatud KA (%)	7-9	7-9	2

- Reoveepuhasti A - sete laotatakse humifitseerimisväljakule ca 30 cm paksuse kihina. Väljaku rajamisel on arvestatud vettpidava kihi olemasoluga ning nõrgvee ära juhtimisega.
- Reoveepuhasti B - humifitseerimisväljakule laotatakse sete ca 10-15 cm paksuse kihina. Väljak on rajatud asfalteeritud pinnale ning kogunev sette nõrgvesi juhitakse kanali kaudu tagasi reoveepuhastisse.
- Reoveepuhasti C - humifitseerimisväljak koosneb 3 sette poldrist, mis on põhjast varustatud vettpidava tihendatud kihiga. Tiheda kihi peal on liivast ja kruusast koosnev drenaazikiht. Tekkiv nõrgvesi kogutakse ja juhitakse tagasi reoveepuhastisse.

2.1 Proovivõtt

Proovid koguti perioodil mai-september 2016 ning igast reoveepuhastist võeti kolme erineva vanusega setet:

- Alla 1 aasta humifitseerimisväljakul käideldud sete (nö toorsete);
- 1-2 aastat humifitseerimisväljakul käideldud sete;
- 2-3 aastat humifitseerimisväljakul käideldud sete.

Kõigilt töös käsitletud humifitseerimisväljakutelt võeti viie punktproovi keskmistatud proov, millest määrati allpool kirjeldatud näitajad. Punktproovid võeti väljakute erinevatest

piirkondadest (äärest, keskelt) võimalikult sarnane kogus ning sarnaselt sügavuselt ca 15-20 cm (horisontaalprofiil). Enne proovivõttu eemaldati väljakul käideldavalt settelt pealmine kobe kiht koos taimedega. Proovid koguti anumasse kokku ning segati ja ühtlustati. Saadud segust võeti väljakut iseloomustav proov. Proovivõtu aluseks võeti keskkonnaministri määrus nr 30 „Proovivõtumeetodid“ [28].

2.2 Analüüsimeetodid

Katsed viidi läbi Tartu Ülikooli Kolloid- ja keskkonnakeemia õppetooli laboris perioodil mai-detsember 2016. Settest määrati kuivainesisaldus, orgaanilise aine sisaldus (põletuskadu), üldlämmastiku (TKN *Total Kjeldahl Nitrogen*) ja üldfosfori ($P_{\text{üld}}$) sisaldus, pH ning hapnikutarve (*OxiTop* katse). Andmeanalüüsis kasutati tabelarvutustarkvara Microsoft Excel.

Parameeter	Metoodika
Kuivainesisaldus	Erineva niiskusesisaldusega setete võrdlemiseks määrati proovidest kuivaine sisaldus. Sete kaaluti (~8 g) ning kuivatati 24 tundi 105°C juures. Seejärel kaaluti sete uuesti. Massierinevuste kaudu arvutati sette kuivainesisaldus. Metoodika EVS-EN 12880
Põletuskadu	Põletuskadu väljendab settes sisalduvat orgaanilist ainet, mis põletamisel settest välja lendub. Määramiseks kuivatati eelnevalt kaalutud sete kõigepealt 24 h 105°C juures ning seejärel asetati 4 tunniks põletusahju 550°C juurde. Orgaanikasisaldus arvutati massierinevuste kaudu. Metoodika EVS-EN 15935
Üldlämmastik	Sete kuivatati 105°C juures ning kaaluti sobiv kogus spetsiaalsesse kolbi. Proovile lisati 3,5 ml kontsentreeritud väävelhapet (H_2SO_4) ning keedeti 440°C juures 4 minutit. Seejärel lisati aeglaselt tilgutades 15 ml vesinikperoksiidi (H_2O_2) ning keedeti veel 1 min. Kasutati

	spetsiaalset Hach Diegdsahl® aparatuuri. Tekkinud ammoniaak analüüsi modifitseeritud Nessleri meetodiga kasutades reagente TKN indikaator, 1M KOH, mineraalstabilisaator, polüvinüülalkohol ja Nessler. Tulemused mõõdeti spektromeetriga Hach Lange DR2800. Määramine põhineb meetodil Hach Lange 8075.
Üldfosfor (P _{üld})	Tahkest ainest fosfori määramise meetod põhineb standardil ISO 6878. Anorgaanilise fosfaadi kompleksühendid ja orgaaniliselt seotud fosfor muudetakse analüüsi käigus happelises keskkonnas ortofosfaadiks kasutades K ₂ S ₂ O ₈ . Oksüdeerimisprotsess toimub suletud anumal rõhu all. Ortofosfaatide (PO ₄ -P) määramiseks kasutati spektrofotomeetrit Hach Lange DR 2800, lainepikkus 850 nm. Reaktiividena kasutati askorbiinhapet C ₆ H ₈ O ₆ ja molübdadilahust (NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ *4H ₂ O.
pH	Tahke aine pH määramine põhineb standardil ISO 10390. Kindel kogus uuritavat setet lahustati destilleeritud vees suhtega 1:5, pH väärtus mõõdeti pH-meetriga Jenway 3520.

2.2.1 Proovide stabiliseerituse määramine *OXITOP*-meetodil

Reoveesette stabiliseerituse hindamiseks saab kasutada ühe meetodina sette hapnikutarvet. Euroopa Komisjoni soovitude kohaselt loetakse stabiliseerituks biojätmeid, mille respiratsiooni aktiivsus 96-tunnise mõõtmisperioodi jooksul on väiksem kui 10 mgO₂/gKA.

Taani DAKOFA standardi järgi jagatakse kompostid orgaanilise aine stabiliseerumise astme alusel nelja rühma [29]:

- toores > 40 mgO₂/gKA
- vähe stabiliseeritud 16 - 40 mgO₂/gKA
- stabiliseeritud 6 - 16 mgO₂/gKA
- väga hästi stabiliseeritud < 6 mgO₂/gKA

Tahke materjali hapnikutarvet saab mõõta *OxiTop* katsega. Antud töös on *Oxitop* katse läbi viidud nõ puhta settega (st pole lisatud tugimaterjale ega kemikaale).

Katse ülesehitus:

- Kindel kogus setet (10 g) pandi manomeetrilise mõõtmissüsteemiga varustatud OxiTop® katsepudelitesse (Joonis 3);
- Pudelis mõõdeti suhtelise rõhu muutust süsteemis hektopaskalites (hPa) valitud perioodil (96 tundi);
 - Rõhk anumask muutub (väheneb), sest settes olevad mikroorganismid lagundavad orgaanilist ainet ning kasutavad selleks hapnikku;
- Mõõtepudelitesse lisati kaaliumhüdroksiidi (KOH) graanulid, et siduda süsihappegaas (CO₂), mis biootilise hapnikutarbe korral gaasifaasi eraldub;
- Rõhu nullnivooks on mõõtepudelite sulgemise ajal olnud õhurõhk;
- Katseperioodi ajal hoitakse uuritava sette pudeleid temperatuuril 20,0 ± 1°C;
- Üleminekuks rõhu muutuselt hapnikutarbele kasutatakse valemit 1:

$$O_2 = \frac{M_r(O_2)}{R \cdot T} * \frac{V_a}{m} * \Delta p \quad (1)$$

kus: O₂ – hapnikutarve, mgO₂/KA

M_r – hapniku molaarmass, 32 000 mg/mol

R – universaalne gaasikontant, 83,14 L*mbar/mol*K

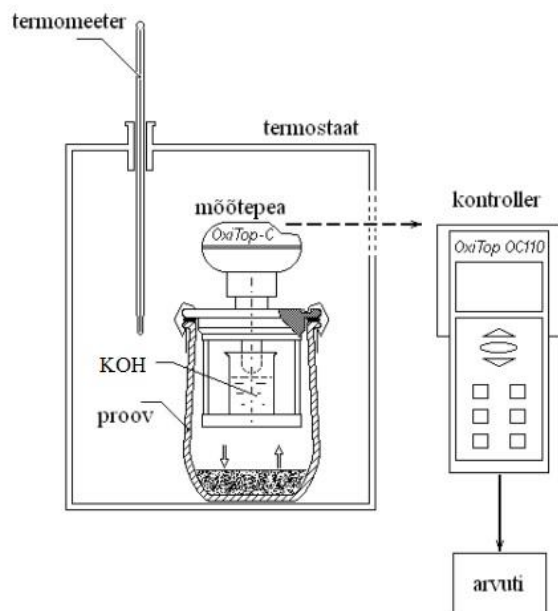
T – mõõtmistemperatuur, K

V_a – õhu ruumala mõõtmisanumas, liitrites (0,5 L)

m – kuivaine mass mõõtmissüsteemis, kg KA

Δp – rõhu muutus mõõtmisanumas, mbar (1 mbar = 1 hPa)

Süsteem mõõdab ja salvestab rõhu vastavalt mõõteperioodile etteantud sagedusega 360 korral ning OxiTop® süsteemi mõõtmistäpsus on 1 mbar.

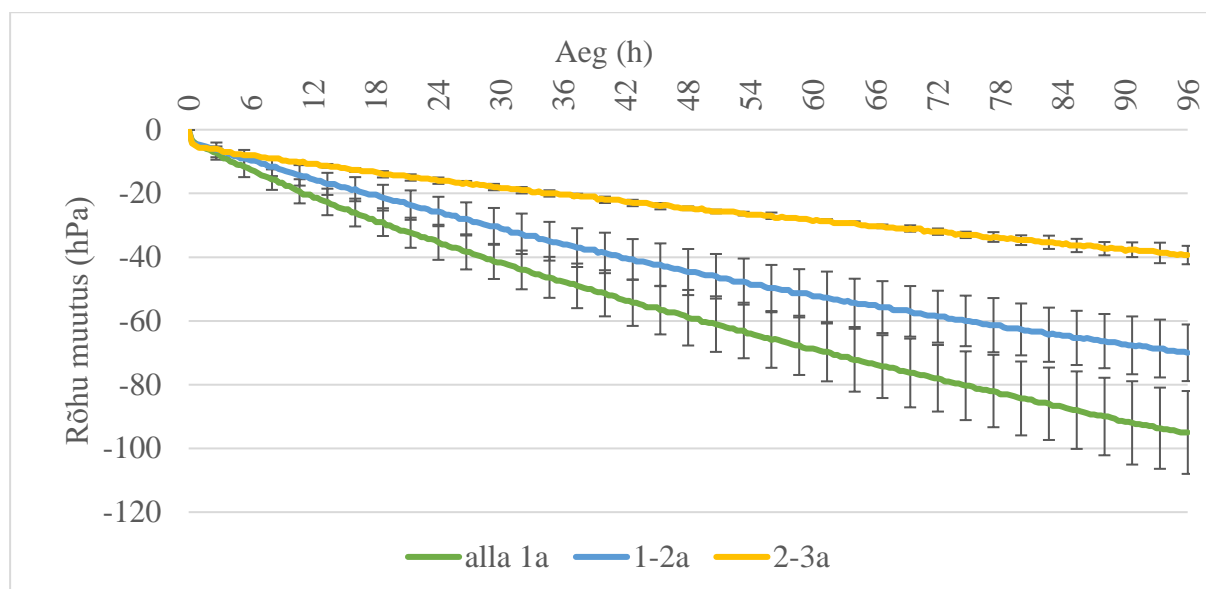


Joonis 3. *OxiTop* manomeetrilise mõõtesüsteemi skeem

3 Tulemused

3.1 Rõhu muutus erinevate reoveepuhastite sette korral

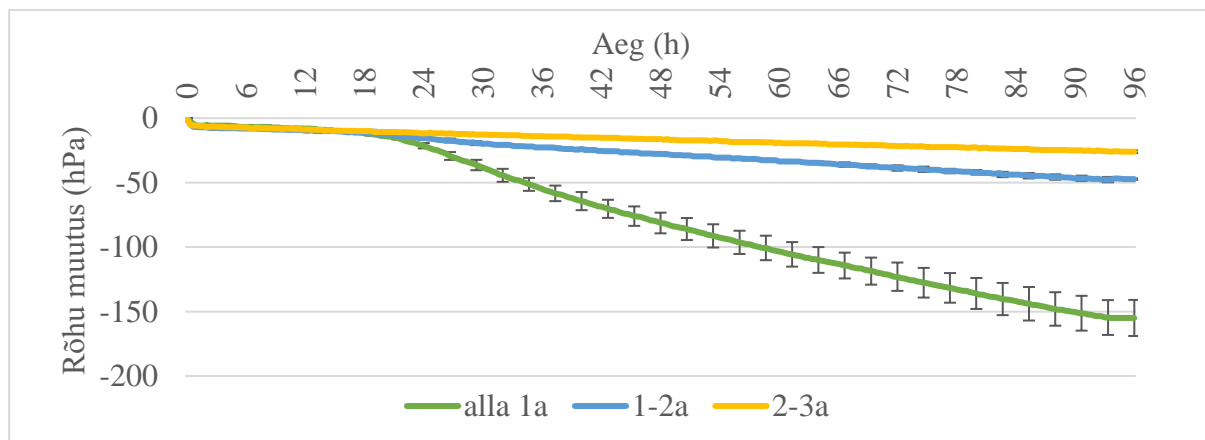
Joonisel 4 on esitatud rõhu muutus mõõtepudelites, mis sisaldasid 10 grammi märgkaalus A reoveepuhasti humifitseerimisväljakul erinevatel perioodidel käideldud setet. 96-tunnise mõõteperioodi jooksul langes rõhk alla 1-aastase käitlemisperioodi sette korral keskmiselt 95 hPa, 1-2 aastat ning 2-3 aastat käideldud sette korral vastavalt 70 hPa ja 40 hPa. Toorsette puhul langes rõhk 25 hPa (26%) võrra rohkem kui 1-2 aastase käitlemisperioodiga sette korral ning 2-3 aastase käitlemisperioodiga võrreldes 55 hPa (58%) rohkem. Kahe viimase (1-2a ja 2-3a) käitlusperioodi võrdluses langes pikemalt käideldud sette korral rõhk 30 hPa (43%) võrra vähem. Rõhu muutuse kaudu arvatud keskmised sette hapnikutarbe väärtused on toodud Joonisel 7.



Joonis 4. Reoveepuhasti A humifitseerimisväljakul käideldud sette hapnikutarve väljendatuna rõhu muutuses (*OxiTop* katse) 96-h mõõteperioodi jooksul. Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

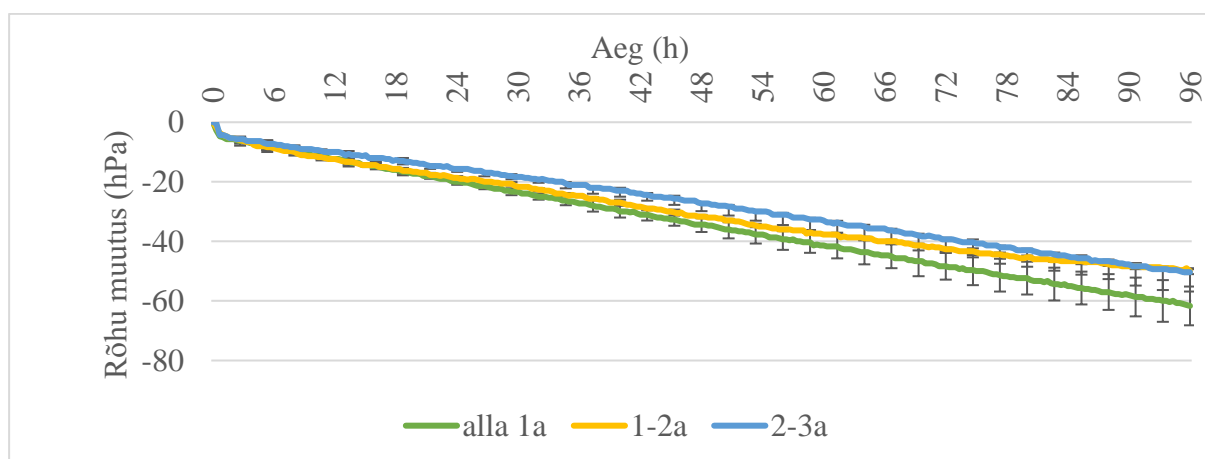
Joonisel 5 on esitatud rõhu muutus mõõtepudelites, mis sisaldasid 10 grammi märgkaalus B reoveepuhasti humifitseerimisväljakul erinevatel perioodidel käideldud setet. 96-tunnise mõõteperioodi jooksul langes rõhk alla 1-aastase käitlemisperioodi sette korral keskmiselt 157 hPa, 1-2 aastat ning 2-3 aastat käideldud sette korral vastavalt 48 hPa ja 26 hPa. Seega toorsette puhul langes rõhk 109 hPa (69%) võrra rohkem kui 1-2 aastase käitlemisperioodiga sette korral ning 2-3 aastase käitlemisperioodiga võrreldes 131 hPa (83%) rohkem. Kahe viimase (1-2a ja 2-3a) käitlusperioodi võrdluses langes pikemalt käideldud sette korral rõhk

22 hPa (54%) võrra vähem. Saadud tulemuste kaudu arvutati erineva käitlusperioodiga setete jaoks keskmine hapnikutarbe väärtus, mis on toodud Joonisel 8.



Joonis 5. Reoveepuhasti B humifitseerimisväljakul käideldud sette hapnikutarve väljendatuna rõhu muutuses (*OxiTop* katse) 96-h mõõteperioodi jooksul. Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

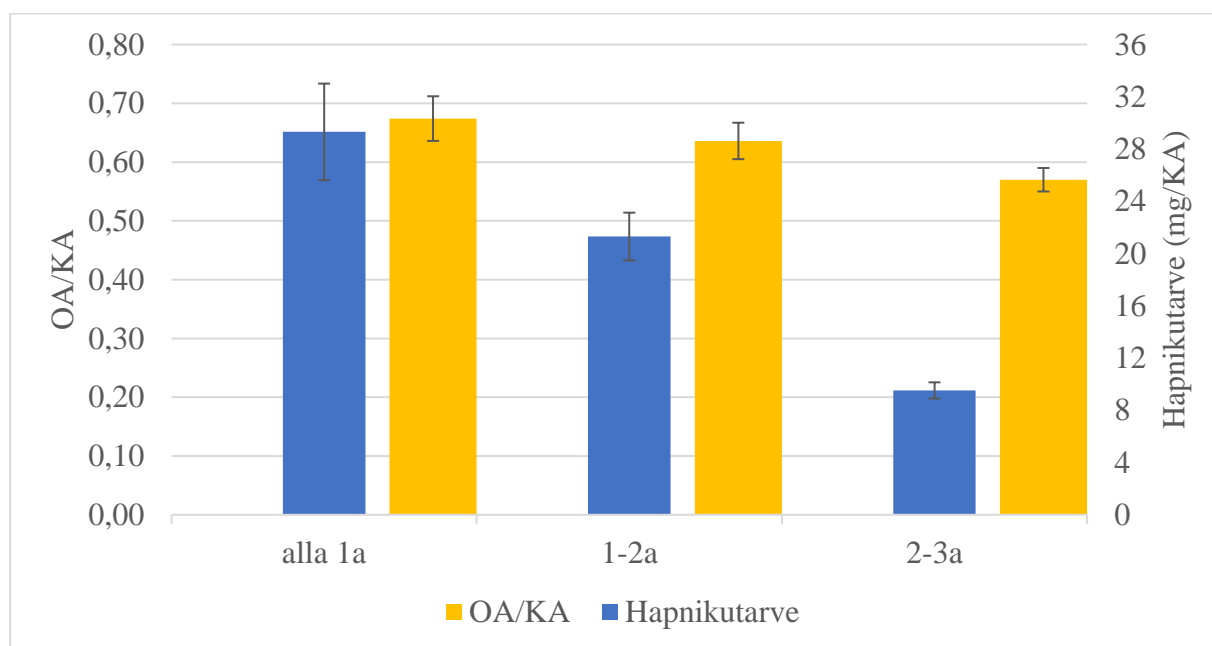
Joonisel 6 on esitatud rõhu muutus mõõtepuudelites, mis sisaldasid 10 grammi märgkaalus C reoveepuhasti humifitseerimisväljakul erinevatel perioodidel käideldud setet. 96-tunnise mõõteperioodi jooksul langes rõhk alla 1-aastase käitlemisperioodi sette korral keskmiselt 62 hPa, 1-2 aastat ning 2-3 aastat käideldud sette korral mõlemal juhul 50 hPa. Toorsette puhul langes rõhk teiste käitlusperioodidega võrreldes 12 hPa (19%) rohkem. Viimase kahe käitlemisperioodi setete rõhu muutuses erinevust ei ole. Setete võrdlemisel tuleb arvestada sette erinevat kuivainet sisaldust (katses kasutati märgkaalus setet).



Joonis 6. Reoveepuhasti C humifitseerimisväljakul käideldud sette hapnikutarve väljendatuna rõhu muutuses (*OxiTop* katse) 96-h mõõteperioodi jooksul. Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

3.2 Reoveesette hapnikutarve ja OA/KA

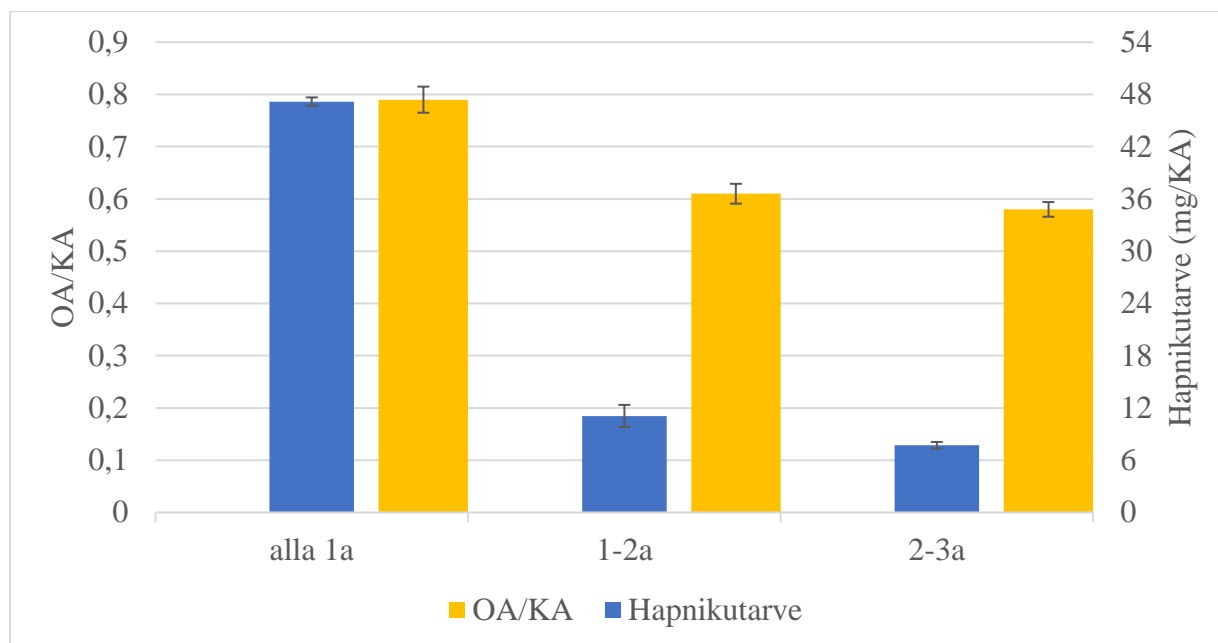
Joonisel 7 on toodud A reoveepuhasti humifitseerimisväljakul käideldud sette hapnikutarve ja OA/KA suhe. Mõlemaid parameetreid kasutatakse sette stabiliseerituse ehk orgaanilise aine sisalduse määramiseks ning nende kohta on keskkonnaministri määruses nr 78 kindlad kriteeriumid. Reoveepuhasti A humifitseerimisväljakul käideldud sette hapnikutarve oli alla 1a käideldud sette korral 29,03 mgO₂/KA, 1-2 aastat käideldud settel oli see 21,3 mgO₂/KA ning kõige pikemalt käideldud sette hapnikutarve oli 9,5 mgO₂/KA. Põletuskao ja kuivaine suhe (OA/KA) oli erinevate käitlusperioodide setete korral vastavalt 0,67 (toorsete), 0,64 (1-2a) ja 0,57 (2-3a). Muutused esinesid sette käitlemisperioodide võrdluses ka kuivainesisalduse osas. Kõige väiksema kuivainesisaldusega oli toorsete (20%) ning kõige suurema kuivainesisalduse oli saavutanud 2-3 aastat humifitseerimisväljakul käideldud sete (26%). Seega antud reoveepuhasti puhul olid analüüsitud parameetrite väärtused ootuspärased, hapnikutarve ja OA/KA suhe langes sette käitlusperioodi pikenemisega ning KA% suurenes.



Joonis 7. Vasakpoolsel y-teljel on A reoveepuhasti sette OA/KA ja parempoolsel y-teljel sette hapnikutarve erinevatel käitlusperioodidel. Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

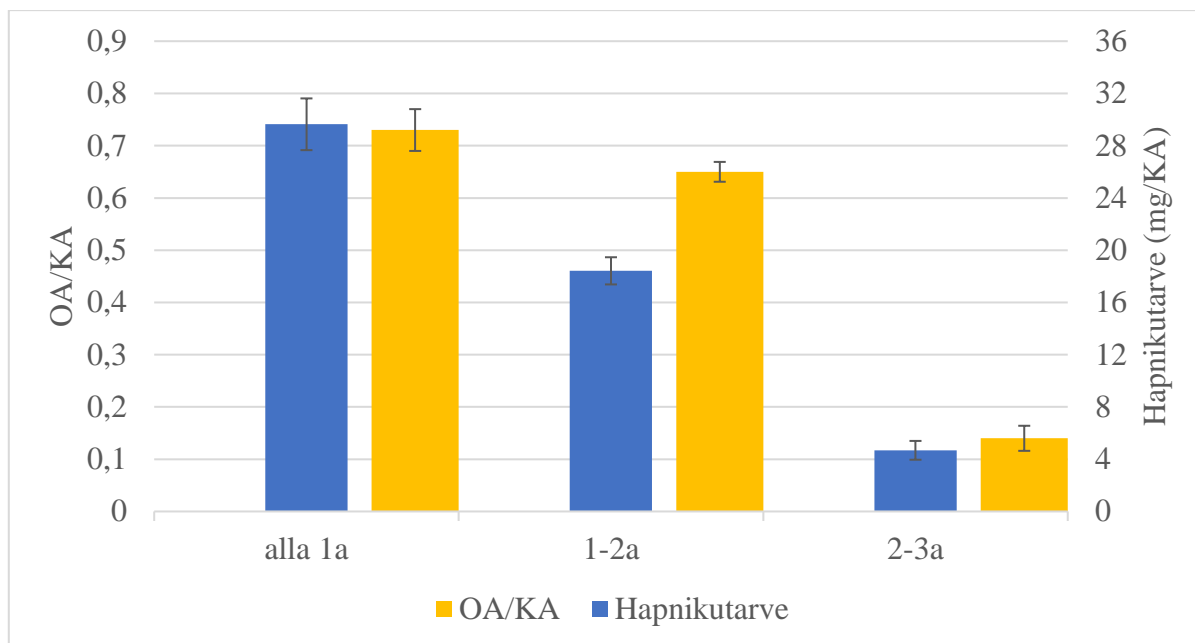
Joonis 8 kirjeldab reoveepuhasti B humifitseerimisväljakul käideldud sette kaht stabiliseeritust näitavat parameetrit (hapnikutarve ja OA/KA). Graafikult on näha, et sette hapnikutarve oli alla 1a käitlusperioodi korral 47,2 mgO₂/KA, 1-2 aastat käideldud settel oli see 11 mgO₂/KA ning kõige pikemalt käideldud sette hapnikutarve oli 7,7 mgO₂/KA. Põletuskao ja kuivaine suhe (OA/KA) oli erinevate käitlusperioodide setete korral vastavalt 0,79 (toorsete), 0,61 (1-2a) ja

0,58 (2-3a). Sarnaselt A reoveepuhastiga on ka siin näha mõlema parameetri vähenemist käitlusperioodi pikenedes. Mõlema parameetri arvutamisel on oluline sette kuivainesisaldus, mis oli antud juhul toorsette korral 20% ning 2-3a käitlusperioodi korral 27%.



Joonis 8. Vasakpoolsel y-teljel on B reoveepuhasti sette OA/KA ja parempoolsel y-teljel sette hapnikutarve erinevatel käitlusperioodidel. Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

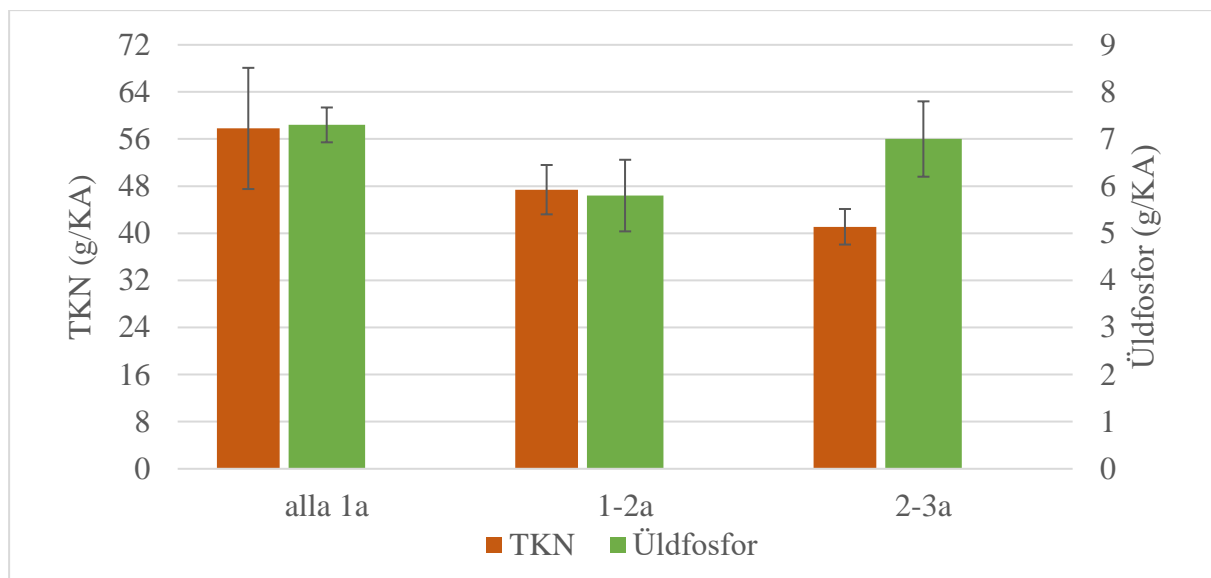
Joonisel 9 on esitatud hapnikutarve ja OA/KA suhe reoveepuhasti C vastavate käitlusperioodide kohta. Reoveepuhasti C sette põletuskao ja kuivaine suhe alla ühe aasta käideldud sette korral oli 0,73, käitlemisperioodil 1-2 aastat oli suhe 0,65 ning viimasel perioodil 0,14. Sette hapnikutarve oli esimesel perioodil 29,6 mgO₂/KA, teisel käitlusperioodil 18,4 mgO₂/KA ning 2-3 aastat käideldud sette korral juba 4,7 mgO₂/KA. Reoveepuhasti C korral laotatakse humifitseerimisväljakule tahendamata sete, mille kuivainesisaldus on ca 2%. Pärast esimest käitlusperioodi oli KA tõusnud 13%-ni ning 2-3 aastat käideldud sette KA oli 68%.



Joonis 9. Vasakpoolsel y-teljel on C reoveepuhasti sette OA/KA ja parempoolsel y-teljel sette hapnikutarve erinevatel käitlusperioodidel. Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

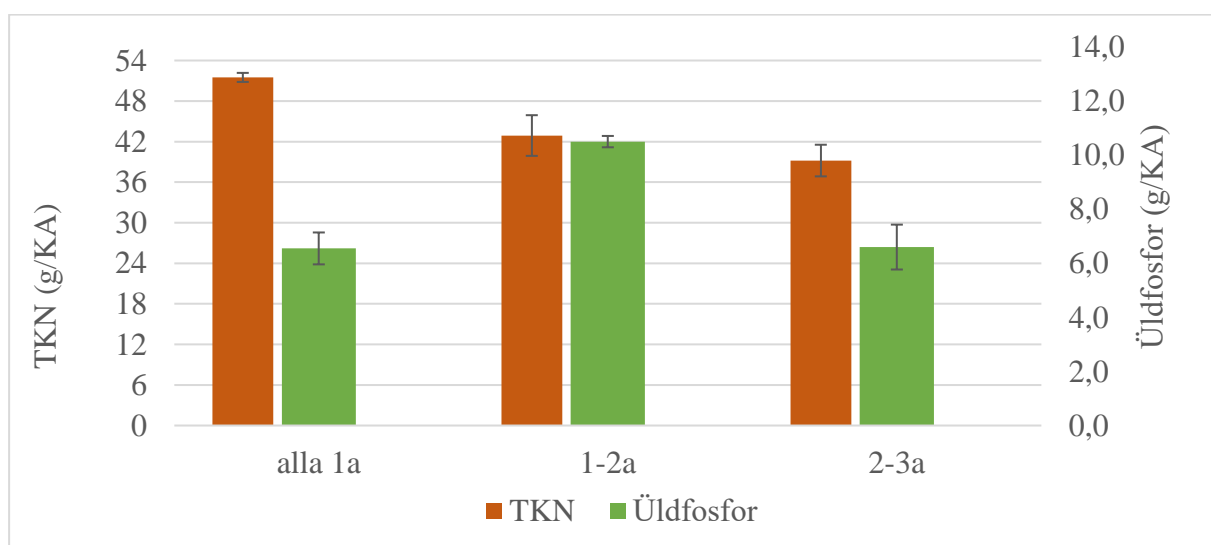
3.3 Sette lämmastiku- ja fosforisisaldus

Joonisel 10 on toodud A reoveepuhasti humifitseerimisväljakul käideldud sette lämmastiku- ja fosforisisaldus erinevate käitlusperioodide lõikes. Mõlemad elemendid on taimedele elutegevuseks olulised ning seetõttu saab reoveesetet kasutada põllumajanduslike muldade väetamiseks ning vähendada tööstuslikult toodetud väetiste osakaalu. Reoveepuhasti A humifitseerimisväljakul käideldud sette üldlämmastiku sisaldus alla 1a käideldud sette korral oli 57,8 g/KA, 1-2 aastat käideldud settel oli see 47,4 g/KA ning kõige pikemalt käideldud sete sisaldas lämmastikku 41,1 g/KA. Fosfori sisaldus settes oli erinevate käitlusperioodide korral vastavalt 7,3 g/KA (toorsete), 5,8 g/KA (1-2a) ja 7,0 g/KA (2-3a).



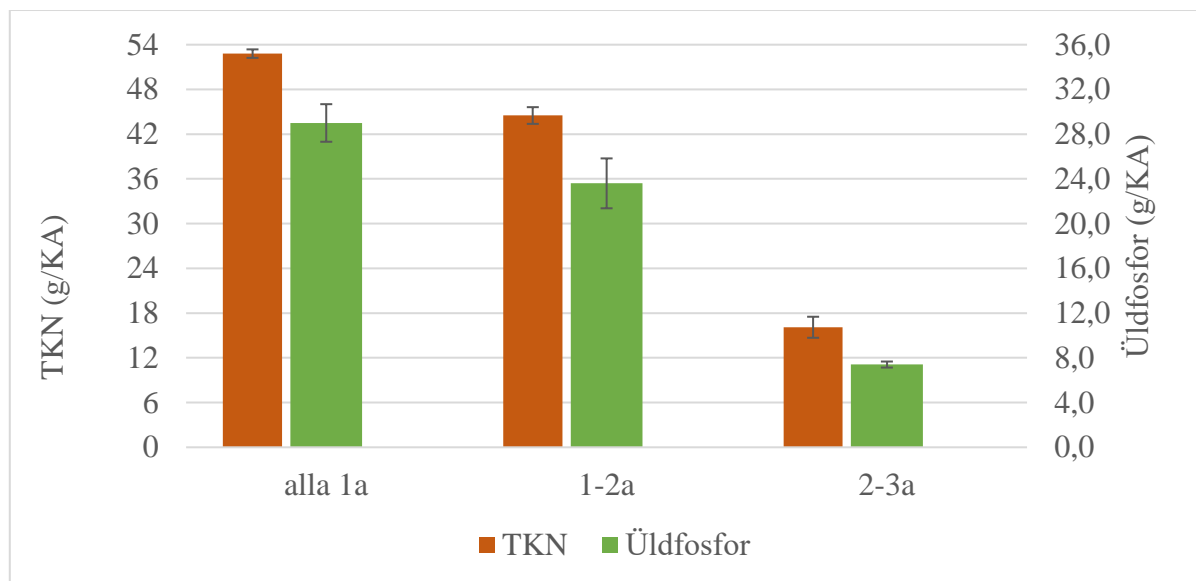
Joonis 10. Humifitseerimisväljakul A erinevatel perioodidel käideldud reoveesette üldlämmastiku ja –fosfori sisaldused (g/KA). Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

Joonisel 11 on toodud B reoveepuhasti humifitseerimisväljakul käideldud sette lämmastiku- ja fosforisisaldus erinevate käitlusperioodide lõikes. Sette üldlämmastiku sisaldus alla 1a käideldud sette korral oli 51,5 g/KA, 1-2 aastat käideldud settel oli see 42,9 g/KA ning kõige pikemalt käideldud sete sisaldas lämmastikku 39,2 g/KA. Fosfori sisaldus settes oli erinevate käitlusperioodide korral vastavalt 6,6 g/KA (toorsete), 10,5 g/KA (1-2a) ja 6,6 g/KA (2-3a). Erinevalt fosforist lämmastiku sisaldus antud reoveepuhasti settes käitlemisaja pikenedes väheneb.



Joonis 11. Humifitseerimisväljakul B erinevatel perioodidel käideldud reoveesette üldlämmastiku ja –fosfori sisaldused (g/KA). Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

Joonisel 12 on toodud C reoveepuhasti humifitseerimisväljakul käideldud sette lämmastiku- ja fosforisisaldus erinevate käitlusperioodide lõikes. Sette üldlämmastiku sisaldus alla 1a käideldud sette korral oli 52,8 g/KA, 1-2 aastat käideldud settel oli see 44,5 g/KA ning kõige pikemalt käideldud sete sisaldas lämmastikku 16,1 g/KA. Fosfori sisaldus toorsettes oli 29 g/KA, 1-2a käitlemisperioodi korral 23,6 g/KA ja viimasel perioodil 7,4 g/KA. Nii lämmastiku kui fosfori sisaldus settes langeb antud reoveepuhasti settes käitlemisperioodi pikenedes.



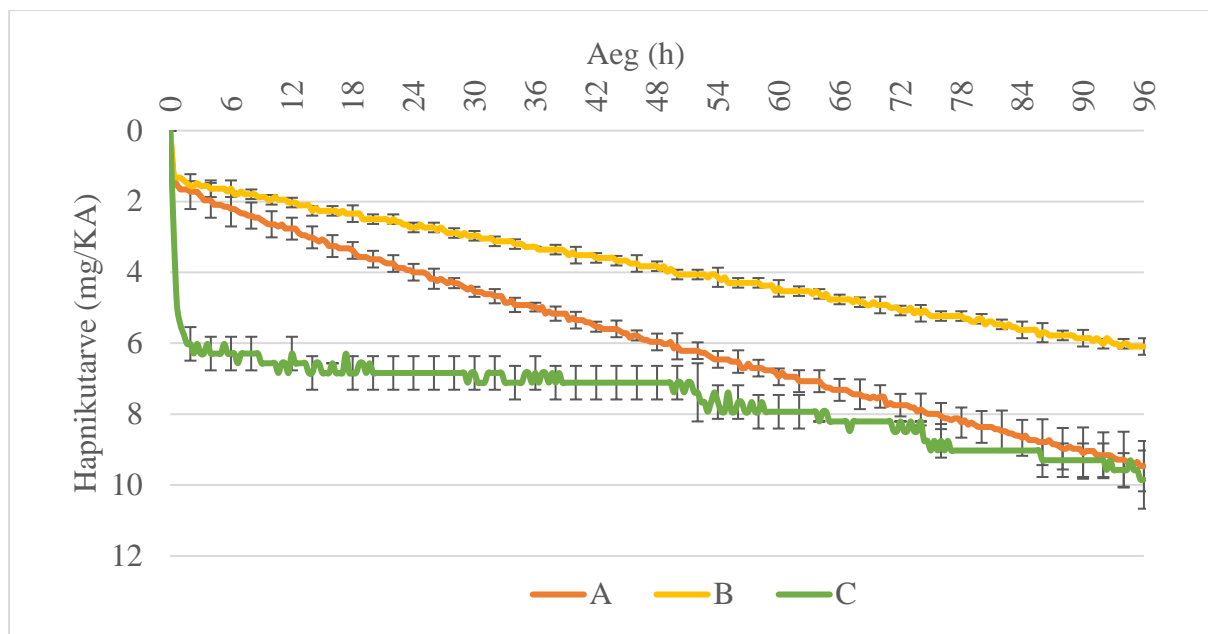
Joonis 12. Humifitseerimisväljakul C erinevatel perioodidel käideldud reoveesette üldlämmastiku ja –fosfori sisaldused (g/KA). Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

4 Analüüs ja arutelu

4.1 Reoveesette stabiliseerituse saavutamine

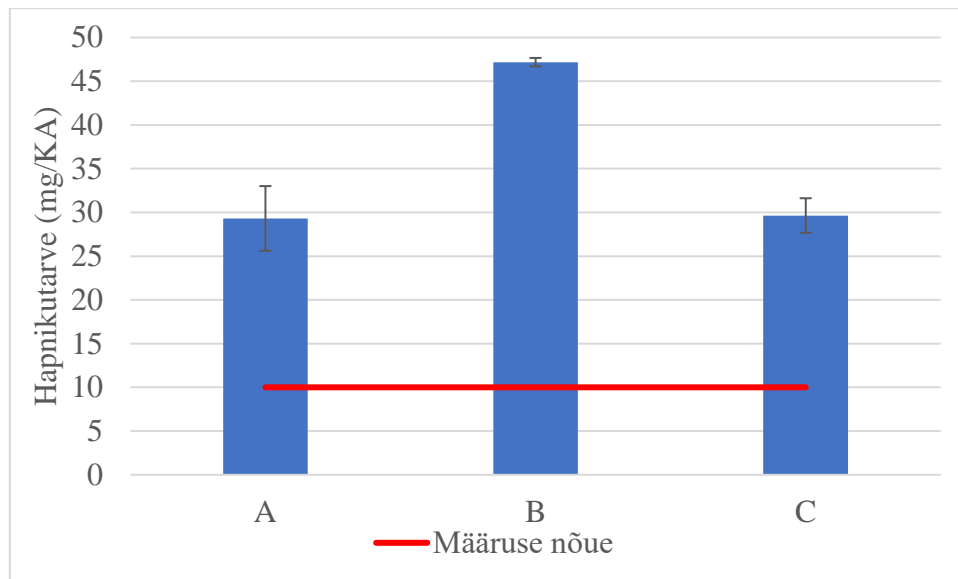
Joonistel 4-6 esitatud rõhu muutuse graafikutelt on näha, et mida lühem on sette käitlemisperioodi pikkus, seda suurem on rõhu muutus anumask. Rõhu vähenemine näitab omakorda, et anumask olevate gaaside kontsentratsioon väheneb. Andmed toetavad teoorias välja toodud väidet, et mida rohkem mikroorganismid hapnikku tarbivad, seda suurem on settes oleva orgaanilise aine kogus. Sarnane rõhu muutuse trend tuli välja kõigi humifitseerimisväljakute korral. Rõhk langes rohkem toorsette korral ning vähem 2-3 aastat käideldud sette korral. 96-tunnise mõõteperioodi jooksul langes rõhk kõige rohkem B reoveepuhasti toorsette (alla 1-aasta käideldud) korral ehk 69% võrreldes 2-3 aastase käitlemisperioodi settega. Saadud tulemus on tõenäoliselt tingitud asjaolust, et B reoveepuhasti toorsete oli humifitseerimisväljakul käideldud teiste puhastitega võrreldes kõige lühemat aega st 2-3 kuud (A ja C toorsete ligi 1 aasta).

Joonisel 13 on kokku võetud eelpool kirjeldatud rõhu muutuste andmed erinevate reoveepuhastite humifitseerimisväljakutel käideldud setete kohta ning väljendatud hapnikutarbe muutusena 96-h perioodil. Joonisel on toodud 2-3 aastat käideldud reoveesette andmed. Kõige suurem ja järsem hapnikutarbe muutus esines reoveepuhasti C sette korral, kus tarve tõusis 10 mgO₂/KA. Kõige väiksem hapnikutarbe muutus esines B reoveesette puhul (6 mgO₂/KA). Hapnikutarbe muutuste erinevused võivad peamiselt olla tingitud asjaolust, et kõigil kolmel humifitseerimisväljakul laotatakse reoveesete väljakule erineva paksusega kihtidena, mistõttu taimede juured ei ulatu reoveesettes ühesugusele sügavusele ning orgaanilise aine lagunemiskiirus on seetõttu erinev. B reoveepuhasti sette korral, kus hapnikutarve langes kõige vähem, laotatakse sete humifitseerimisväljakule u 10-15 cm kihina, samas A ja C korral umbes 25-30 cm kihina.



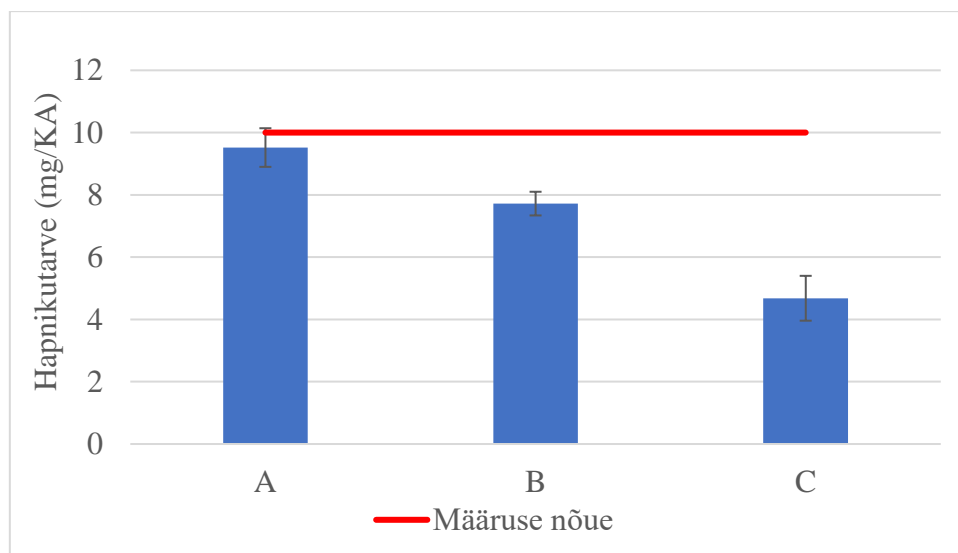
Joonis 13. Erinevate reoveepuhastite humifitseerimisväljakul 2-3 aastat käideldud sette hapnikutarve 96-tunni jooksul. Vearibad väljendavad mõõtmise standardhälvet.

Joonis 14 kirjeldab erinevatel humifitseerimisväljakutel oleva nõ toorsette keskmist hapnikutarvet (mgO_2/KA). Graafikult on näha, et kõik reoveesetted ületavad keskkonnaministri määrusest tulenevat nõuet ($10 \text{ mgO}_2/\text{KA}$) jäädes vahemikku $29,3 \dots 47,2 \text{ mg/Kg}$. Mida suurem on hapnikutarve, seda rohkem on settes orgaanilist ainet ning seda vähem stabiliseeritud settega on tegemist. Kuna setet on humifitseerimisväljakul käideldud lühikest aega (alla 1 a) ning settes olev orgaaniline aine pole jõudnud laguneda, siis kõrged hapnikutarbe väärtused on ootuspärased. Kõige kõrgem hapnikutarbe väärtus esineb B reoveesetel ($47,2 \text{ mg/gKA}$), mis on tingitud asjaolust, et antud humifitseerimisväljakul oli setet käideldud teiste reoveepuhastitega võrreldes kõige lühemat aega (paar kuud).



Joonis 14. Erinevate reoveepuhastite humifitseerimisväljakul alla 1 aasta käideldud reoveesette hapnikutarve 96-tunnisel mõõtmisperioodil. Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

Joonisel 15 on toodud 2-3 aastat humifitseerimisväljakul käideldud sette hapnikutarbe väärtused. Kõigil objektidel on saavutatud sette stabiliseeritus, sest mõõdetud hapnikutarve jääb alla 10 mg/KA (vahemikus 4,7...9,5). Kui võtta arvesse, et hajumine keskmisest võib olla A sette puhul 0,62, siis näeme, et seda setet võib antud kontekstis määratlenda ka kui stabiliseerimata setet.

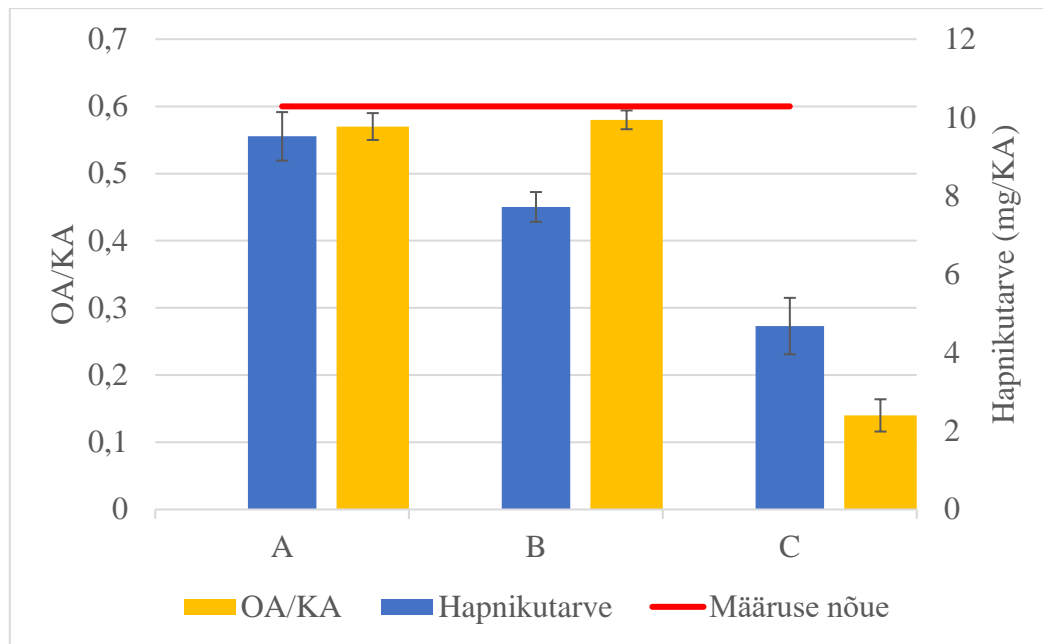


Joonis 15. Humifitseerimisväljakutel 2-3 aastat käideldud reoveesette hapnikutarve 96-tunnisel mõõtmisperioodil. Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

Joonistel 7-9 toodud erinevate reoveesetete põletuskao ja kuivaine suhetest (OA/KA) erinevatel humifitseerimisväljaku käitlemisperioodidel on näha, et esimesel kahel perioodil (alla 1a ja 1-2a) ei täida setted keskkonnaministri määrusest tulenevat nõuet, mis ütleb, et reoveesete on stabiliseeritud juhul, kui sette OA/KA jääb alla 0,6. Samas on näha, et pikema käitlusperioodi korral (2-3 aastat) saavutab sete vajaliku stabiliseerituse taseme. Kusjuures suurem OA/KA suhte langus on kahel juhul (A ja C) täheldatav just 1-2a ja 2-3a käitlusperioodi korral. Mida madalam on OA/KA suhe, seda stabiliseeritum on sete.

Sama tendents oli täheldatav ka sette hapnikutarbe muutuste osas. Võib eeldada, et see on tingitud asjaolust, et äsja humifitseerimisväljakule suunatud sete sisaldab olulisel määral vett ning taimed kasutavad oma elutegevuse käigus kõigepealt ära veest omastatavad toitained ning seejärel tarvitatakse reoveesettes olevaid toitaineid. Kuna pärast kaht aastat käitlemist on reoveesete kuivainesisaldus oluliselt tõusnud (17% KA 60%-le KA) ning vett on vähem, siis taimed ammutavad vajalikud toitained peamiselt settest. Nende tulemuste põhjal on humifitseerimisväljaku meetodi kaudu võimalik tagada sette stabiliseeritus 2-3 aastase käitlemisperioodi jooksul (kirjanduses 2-4) [25].

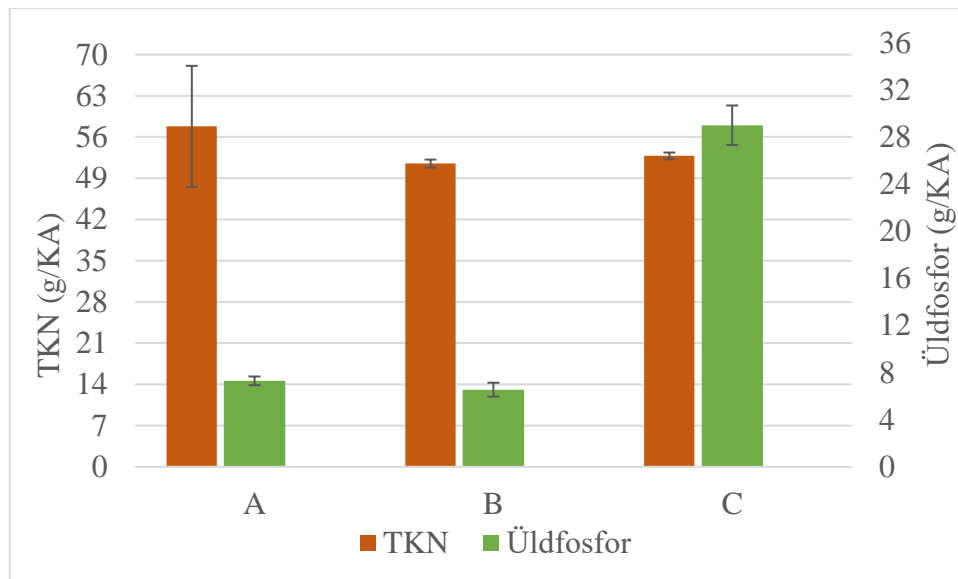
Joonis 14 kirjeldab kaht sette stabiliseeritust näitavat parameetrit (OA/KA ja hapnikutarve). Kõigi reoveepuhastite korral jäävad mõlemad parameetrid allapoole seadusest tulenevat nõuet, mis tähendab, et setet võib käsitleda stabiliseerunuks. Üldjuhul kasutatakse sette stabiliseerituse hindamiseks pigem OA/KA suhet. Hapnikutarve on hea meetod aktiivse orgaanilise aine sisalduse määramiseks, kuid see ei määra otseselt orgaanilist ainet ning hapnikutarve võib olla inhibeeritud ja seetõttu saadakse valepositiivseid tulemusi. Lisaks eelistatakse põletuskao ja kuivainesisalduse alusel orgaanilise aine hindamist meetodi lihtsuse tõttu.



Joonis 16. Vasakpoolisel y-teljel on erinevate reoveepuhastite 2-3 aastat humifitseerimisväljakul käideldud reoveesette hapnikutarve (mgO_2/KA) ning parempoolisel y-teljel OA/KA suhe. Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

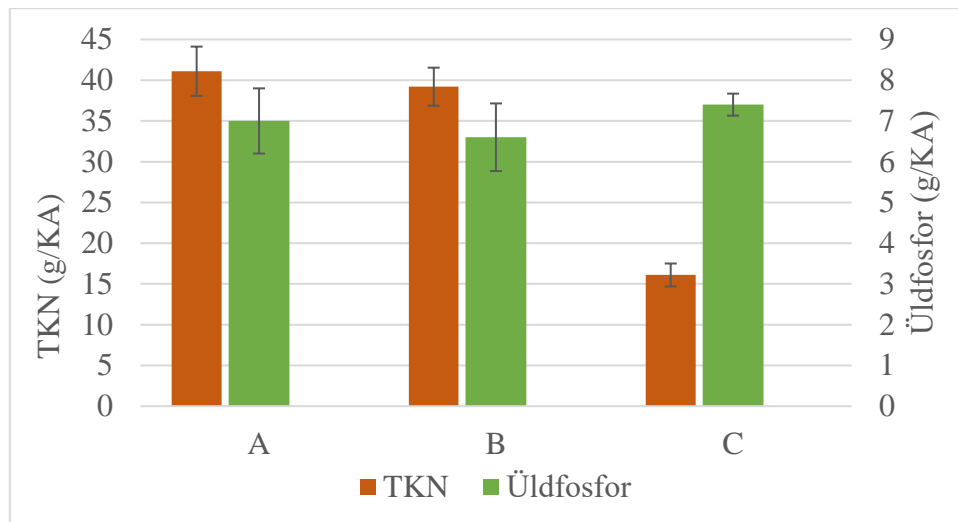
4.2 Sette põllumajanduslik väärtus

Reoveesetted sisaldavad küllaldaselt põllumajanduslikult väärtuslikke toitaineid nagu fosfor ja lämmastik, mis tähendab, et reoveesetet saaks efektiivse käitlemise korral kasutada põllumajanduses. Joonisel 17 on toodud kolme reoveepuhasti keskmine üldlämmastiku ja üldfosfori sisaldus töötlemata reoveesettes, mis olid vastavalt 54 g/KA (N) ja 14,3 g/KA (P). Toitainete tasakaal ehk keskmine lämmastiku ja fosfori suhe N:P algsetes oli 3,8:1. Eesti teistes reoveepuhastites tehtud varasemad uuringud on keskmiseks lämmastiku sisalduseks saanud $59,3 \pm 12,4$ g/KA ning fosfori puhul $18,3 \pm 7,1$ mg/KA. Antud töö tulemused näitavad, et eksperimentaalses töös kasutatud reoveesetete lämmastiku sisaldus langeb enam-vähem kokku laiema uuringu tulemustega, kuid fosfori osas olid humifitseerimisväljakutel käideldud sette väärtused oodatust väiksemad. Joonisel 17 on näha, et oluliselt madalama fosforisisaldusega eristuvad A ja B reoveesete ning kõrgeim fosforisisaldus toorsetes oli C reoveepuhasti korral (29 g/KA). Toitainete sisaldus settes on sõltuv konkreetsest sissetulevast reoveest, reoveepuhasti tehnoloogiast ning puhasti opereerimisest.



Joonis 17. Üldlämmastiku ja -fosfori sisaldused erinevate reoveepuhastite toorsettes (alla 1a käideldud). Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

Joonisel 18 on näidatud kõigi kolme uuritud reoveepuhastite sette üldlämmastiku ja -fosfori sisaldused, setet on väljakul käideldud 2-3 aastat. Võrreldes toorsettega (Joonis 17) ei ole lämmastiku ega fosfori osas A ja B settel märgata suurt kontsentratsiooni langust. Antud tulemused viitavad sellele, et konkreetsetel humifitseerimisväljakutel ei toiminud märkimisväärset toitainete ärakannet, mistõttu säilib sette väärtuslikkus põllumajanduslikust aspektist vaadatuna. Kõige rohkem tuleb toorsetet ja 2-3 aastat käideldud reoveesetet võrreldes esile C reoveepuhasti lämmastiku ja fosfori kontsentratsiooni langus. Antud väljakul oli sette KA% teiste puhastitega võrreldes esimestel perioodidel madalam st humifitseerimisväljakule laotatakse tahendamata sete kuivainesisaldusega ca 2%. Humifitseerimise käigus mineraliseerunud toitained (eriti lämmastik) on tõenäoliselt settest drenaaživeega ära kantud. Saadud andmetest võib järeldada, et sette toitainete sisalduse säilitamiseks tuleks väljakule kanda peaaesjalikult tahendatud setet. Kõrgema kuivainesisalduse juures püsivad lämmastik- ja fosforühendid paremini settes.



Joonis 18. Humifitseerimisväljakul 2-3a käideldud sette keskmine üldlämmastiku sisaldus vasakpoolsel y-teljel ja üldfosfori sisaldus parempoolsel y-teljel. Vearibad väljendavad mõõtmiste standardhälvet.

4.3 Soovitused

Kirjanduse ja käesoleva töö tulemuste põhjal võib humifitseerimisväljakute rajamiseks/opereerimiseks anda järgmised soovitused:

- Sete tuleks väljakule kanda võimalikult õhukeste kihtidena ca 10-15 cm;
- Setet peaks väljakul käitlema vähemalt 3 aastat, et saavutada stabiliseerituse nõuded;
- Sette koormus väljakule ei tohiks ületada 30-60 kgKA/m²a;
- Väljaku koormamist reoveesetega tuleks alandada kui aastane sadamete hulk ületab 800 mm, evaporatsioon on < 500 mm või keskmine õhutemperatuur on alla 13°C;
- Sette laotamine (koormus väljakule) peaks olema talvel väiksem, sest veetustamine ja mineraliseerumine toimub aeglasemalt;
- Taimestikku niita ainult vajadusel (nt suure tiheduse korral), et ei toimuks taimede kaudu toitainete ärakannet;
- Toitainete settest väljaleostumise vähendamiseks tuleks väljakule kanda eelnevalt tahendatud sete;
- Pillirooväljaku puhul tuleb väljaku rajamisel tagada populatsiooni piisav kasv enne sette laotamist väljakule;
- Sette väljakaevamisel tuleb hiljem taastada poldri drenaažisüsteem juhul, kui see on kahjustunud või ummistunud, et tagada järgmise tsükli efektiivsus (sette veetustumine);

Kokkuvõte

Huvi keskkonnaprobleemide ja -küsimuste vastu on maailmas järjest kasvava trendiga. Reovee käitlemise temaatikas on olulisteks aspektideks ja väljakutseteks keskkonna osas peamiselt protsessi efektiivsus ning tekkiva sette edasine käitlemine ja ringlussevõtt. Reoveesete on reovee töötlemise peamine kõrvalprodukt, mis koosneb nii tahkest kui vedelast faasist. Kuna sete sisaldab olulisel määral erinevaid keskkonnale ohtlikke ja koormavaid saasteaineid (orgaanika, lämmastik, fosfor, raskmetallid, patogeenid jm), siis tuleb setet enne kasutuselevõttu või ladestamist vajalikul määral käidelda. Efektiivne käitlusmeetod on selline, mis tagab reoveesete nõuetekohasuse ning ringlussevõtu võimaluse ilma keskkonda kahjustamata.

Väikestes reoveepuhastites tekkinud sette kogus on ei võimalda reoveesete käitlemise meetoditena rakendada näiteks kohapealset metaankääritamist, mistõttu on üheks võimaluseks sette humifitseerimisväljakute rajamine.

Käesolev töö andis ülevaate reoveesetest üldiselt ning selles sisalduvatest ainetest, reoveesete kasutamisega seotud seadusandlikust taustast ning humifitseerimisväljakutest kui ühest võimalikust alternatiivist sette käitlemisel. Töö praktiline osa ning arutelu toetus kolme Eesti väikereoveepuhasti reoveesete parameetrite analüüsil.

Tulemused näitasid, et lühema aja jooksul (alla 1 aasta) humifitseerimisväljakul käideldud sette stabiliseerituse parameetrid (hapnikutarve ja OA/KA) olid ootuspäraselt kõrgemad 2-3 aastat käideldud sette väärtustest ning ületasid keskkonnaministri määrusega etteantud nõudeid, jäädes vahemikku 29...47 mgO₂/KA (hapnikutarve) ja 0,67...0,79 OA/KA. Siiski selgus, et humifitseerimisväljakul käideldud reoveesetel on võimalik saavutada keskkonnaministri määrusest tulenevaid stabiliseerituse nõudeid 2-3 käitlusaastaga. Stabiliseeritust hinnati nii sette hapnikutarbe (mgO₂/KA) kui põletuskao ja kuivaine (OA/KA) suhte järgi. Mõlema parameetri alusel võib 2-3 aastat humifitseerimisväljakul käideldud setet hinnata stabiliseerituks.

Kolme reoveepuhasti keskmine üldlämmastiku ja üldfosfori sisaldus töötlemata reoveesettes oli vastavalt 54 g/KA (N) ja 14,3 g/KA (P). Pärast 2-3 aastat sette käitlemist ei olnud tahendatud sette laotamisel väljakule täheldatud olulist toitainete ärastamist, millest tulenevalt anti käesolevas töös soovitus eelnevalt tahendatud sette humifitseerimisväljakule laotamiseks, sest sellisel juhul vähendatakse toitainete väljaloestumise võimalust.

Summary

Sewage sludge treatment in humification bed system

It is widely accepted that interest in environmental issues is constantly increasing. The treatment of sewage leads to the production of large amounts of a secondary waste product – sewage sludge. The handling of sewage sludge is one of the most significant challenges in wastewater management. The quality of the sludge depends on the wastewater treatment technology, and excessive contents of pathogens, heavy metals and organic pollutants are of concern. One possible solution is to use it as a soil fertilizer, but the use of this is limited and in some cases even banned if the sludge contains heavy metals, persistent toxic organic substances and pathogenic microorganisms.

Before disposal, municipal sludge should be treated to eliminate the bacteria, viruses and organic pollutants. In small municipal wastewater treatment plants the amount of sewage sludge produced do not allow to establish anaerobic sludge digestion and therefore one alternative for sludge treatment is humification bed systems.

This paper focuses on topics related to sewage sludge – substances, legislation, treatment and reuse. The practical part and the discussion is supported by sludge analysis of three Estonian municipal wastewater treatment plant. The main objective of this work is to evaluate humificated sludge compliance with legislation (Regulation of the Minister of the Environment nr 78).

In raw sludge from the wastewater treatment plant the average value of oxygen demand was 35,3 mgO₂/DS and organic matter content 73%. The loaded sludge created a layer approximately 10–30 cm deep. Analysis of the sludge residue from humification bed system (after 2–3 years of treatment) indicated that organic matter content and values of oxygen demand was reduced approximately 79% and 30% respectively. The results show that sludge that is treated in short period of time (under 1 year) has higher oxygen demand and VS/DS values than for longer treated sludge (2–3 years). Sewage sludge can achieve needed stabilization requirements during 2–3 years of treatment.

The quality of the final product with respect to stabilization is such that recycling the sludge and containing biosolids to agriculture as an enhanced treated product is possible. Although heavy metals and pathogen removal require further research.

Kasutatud allikad

- [1] Smith, S. R., "Management, use and disposal of sewage sludge," UNESCO encyclopedia of life support systems (EOLSS), no. 2. 2002.
- [2] Fytli, D., Zabaniotou, A., "Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods — A review," vol. 12, pp. 116–140, 2008.
- [3] Keskkonnaministeerium, "Asulareovee puhastamise direktiivi nõuete täitmine Eestis," 2012.
- [4] Euroopa Ühenduste Nõukogu, "Nõukogu direktiiv 91/271/EMÜ asula reovee puhastamise kohta," pp. 26–38, 1991.
- [5] Ghulam, S., Khan, M. U., Khan, N., Khan, S., Usman K., "Sewage Sludge: An Important Biological Resource for Sustainable Agriculture and Its Environmental Implications," vol. 2012, no. December, pp. 1708–1721, 2012.
- [6] European Commission, "Disposal and recycling routes for sewage sludge Part 3 – Scientific and technical report," 2001.
- [7] Eesti Keskkonnauuringute Keskus, "Reoveesette töötlemise strateegia väljatöötamine, sh ohutu taaskasutamise tagamine järelevalve tõhustamise, keemiliste- ja bioloogiliste indikaatornäitajate rakendamise ning kvaliteedi süsteemide juurutamise abil III etapp" 2012.
- [8] Barakat, M. A., "New trends in removing heavy metals from industrial wastewater," Arab. J. Chem., vol. 4, no. 4, pp. 361–377, 2011.
- [9] Eesti Keskkonnauuringute Keskus, "Reoveesette töötlemise strateegia väljatöötamine, sh ohutu taaskasutamise tagamine järelevalve tõhustamise, keemiliste- ja bioloogiliste indikaatornäitajate rakendamise ning kvaliteedi süsteemide juurutamise abil II etapp," 2010.
- [10] Gerba, C., Straub, T., "Hazards from Pathogenic Microorganisms in Land-Disposed Sewage Sludge Article in Reviews of environmental contamination and toxicology," no. December 2014.
- [11] Lindberg, R., "Determination of antibiotic substances in hospital sewage water using solid phase extraction and liquid chromatography/mass spectrometry and group analogue internal standards," vol. 57, pp. 1479–1488, 2004.
- [12] Kümmerer, K., "Pharmaceuticals in the Environment," 2001
- [13] Kümmerer, K., "Significance of antibiotics in the environment," no. June, pp. 5–7, 2003.
- [14] Lillenberg, M., "Residues of some pharmaceuticals in sewage sludge in Estonia, their stability in the environment and accumulation into food plants via fertilizing," Tartu, 2011.
- [15] Report "Annual epidemiological report- Reporting on 2011 surveillance data and 2012 epidemic intelligence data 2013".
- [16] Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv 2008/98/EÜ, 2008.
- [17] Keskkonnaministeerium, "Regionaalsete reoveesette käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesette kohta III osa aruanne," 2015.
- [18] Euroopa Nõukogu direktiiv 86/278/EMÜ Keskkonna ja eelkõige pinnase kaitsmise kohta reoveesetete kasutamisel põllumajanduses," 1986.
- [19] Keskkonnaministri määrus nr 78, "Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded," hetkel kehtiv.
- [20] Keskkonnaministri määrus nr 7, "Biolagunevatest jäätmetest komposti tootmise nõuded," hetkel kehtiv.

- [21] Montforts, M., “The trigger values in the environmental risk assessment for (veterinary) medicines in the European Union: a critical appraisal,” 2005.
- [22] Lundin, M., Olofsson, M., Pettersson, G. J., Zetterlund, H., “Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options,” vol. 41, pp. 255–278, 2004.
- [23] Conde, S., Isabel, M., “Influence of the application of sewage sludges on soil microbial activity,” vol. 8524, no. February 2016.
- [24] Turovskiy, I. S., "Wastewater sludge processing," 2006.
- [25] Pabsch, H., "Batch Humification of Sewage Sludge in Grass Beds," 2004.
- [26] German Development Agency, IPP Consult, "Case study: Sewage sludge conversion in Egypt," 2002.
- [27] Nielsen, S., “Sludge treatment and drying reed bed systems,” *Ecohydrology and Hydrobiology*, vol. 7, no. 3–4, pp. 223–234, 2007.
- [28] Keskkonnaministri määrus nr 30, “Proovivõtumeetodid,” hetkel kehtiv.
- [29] Waste and Resource Network Denmark <https://dakofa.com/>, viimati vaadatud 22.05.2017

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, _____ Eeva Vahtramäe _____,
(*autori nimi*)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
_____ Reoveesette käitlemine humifitseerimisväljakutel _____,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendajad on _____ Taavo Tenno ja Markus Raudkivi _____,
(*juhendajate nimed*)

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **23.05.2017**